

中古 VLCC 利用による外海工事用仮設浮防波堤の開発

Development of a floating breakwater for marine construction by using a used VLCC

佐藤英輔* • 池上国広** • 友井武人*** • 工藤秀雄****

Eisuke Sato, Kunihiro Ikegami, Taketo Tomoi and Hideo Kudo

A calm sea area is necessary to keep safety and operation of workvessel for marine construction of large-scale floating structures and artificial islands in open sea. For these purposes, floating breakwaters have been receiving great interest from the view of adaptability to water depth, movability after works, etc. In this study, floating breakwaters utilizing a used VLCC have been developed. In order to get the better performance effectively, a concept of remodeling hull form and a proper arrangement of floating breakwaters were established. A cost effectiveness of the floating breakwater and operation rate of workvessel were evaluated, and the practicality of the floating breakwater by using a used VLCC was confirmed for marine construction.

Keywords : floating breakwater, VLCC

1. はじめに

沿岸域における海洋空間の有効利用のひとつとして、大規模な人工島や海上空港の建設などが促進されようとしている。しかしながらこれらは、従来に比べてより沖合の、外海の波浪の影響を受ける海域に建設され、その工事に携わる作業船の安全性と稼働率の確保には大変な困難が伴うものと考えられる。これに対処する方策としては、その工事海域を一時的に静穏化することが有効であり、その方法としては、工事後の移動性、水深変化への適応性などを考慮して、浮防波堤が適しているものと考えられる。しかしながら、一般的に浮防波堤は、海象条件の穏やかな内海で利用されており、消波対象とする波の周期は5~6s以下と比較的短いものになっている¹⁾。2)。外海の長周期の波を消波することの可能な浮防波堤に関しては、著者の一人らが、内部自由水を利用した新しい型式のものを提案している^{3), 4)}程度で、研究例は非常に少なく、既存の浮防波堤では、かなりの規模のものが必要となり、経済性を損うこととなる。ところが、たまたまIMO(国際海事機関)のルール変更により、今後順次スクラップ化されると考えられる中古のシングルハルVLCC(超大型タンカー)の存在に着目し、資源の有効利用を兼ねて中古VLCCを利用した浮防波堤により静穏海域を創出する技術を開発することとした。

本研究では、中古VLCCを利用して効果的に静穏海域を創出するため、船体改造による消波性能の向上及び複数の堤体の効果的な配置などに関する技術検討を実施するとともに、その実用化のための稼働率や経済性の評価を行った。

2. 中古 VLCC の浮防波堤への改造案

中古VLCCの浮防波堤としての利用を、より効果的にするため、船体改造によって消波性能の向上を計ることとした。

2-1. 船体改造の基本形状

浮防波堤に関しては、今世紀初頭からの数多くの研究が発表されているが、それらを型式別に分類してみると、次の5種類に分けられるようである^{1), 2)}。

- ① 海中に垂直支壁を形成する浮体を係留固定し、入射波を反射させる型式
- ② 水面付近に傾斜壁を形成する浮体を係留固定し、波エネルギーを造渦などにより消散させる型式⁵⁾
- ③ 波の軌道運動を妨げ、摩擦又は造渦により波の持つエネルギーを逸散させる型式⁶⁾
- ④ 海綿のようなフキシブルな浮体を浮かせて、水粒子との間の摩擦により波エネルギーを消失させる型式⁷⁾
- ⑤ 入射波と浮体動揺との位相差により入射波を反射させる型式⁸⁾

これらのうち、⑤は、浮体の動揺のいわゆるインピーダンスを変化させることによって消波特性を設計できることを示唆するものであり、著者の一人らが開発した外海型浮消波堤も、この型式に属するものである。これは浮体の内部に運動する流体部分を設けて浮体動揺のインピーダンスを変化させており、バラストタンクの形状に若干の工夫を加えるだけで良好な消波性能が得られる利点がある^{3), 4)}。中古VLCCの船体改造もこの型式を基本とすることとし、次の5種類の船体改造の基本形状を選定した。

* 非会員 東亜建設工業株式会社

** 非会員 三菱重工業株式会社 長崎研究所 (〒851-03長崎市深堀町5丁目717-1)

*** 非会員 三菱重工業株式会社 船舶技術部

**** 非会員 社団法人 日本作業船協会

- ① 原 船 型 : 24万トン級オイルタンカー
- ② 双 胴 型 : 中央タンクの船底に開口を設け、タンクの流体運動と船体運動を連成させたもの
- ③ 開放ART型 : 両ウイングタンクの船底に開口を設け、タンクの流体運動と船体運動を連成させたもの
- ④ 低 反 射 型 : 船体側外板にスリットを設け、波エネルギーを渦エネルギーなどに変換するもの
- ⑤ 振動水柱型 : 波側サイドタンクの船底に開口を設け、振動水柱とすることで波エネルギーを減少させるとともに、流体運動と船体運動を連成させたもの

各基本形状の断面の概念図を図-1に示す。

2-2. 2次元消波性能計算

船体改造の基本形状について、基本的な消波性能の特性を把握するため、2次元消波性能計算を実施した。

原船型は、24万トン級オイルタンカーとしたが、その主要目を表-1に示す。計算結果の例として、原船型及び双胴型に対して、喫水を基準状態($d = 19.9\text{m}$)及び10mと25mに変更した場合の計算結果を図-2に示す。図には、規則波中における各喫水状態の透過率(透過波高/入射波高)を波長/船幅の関数として示している。

原船型の場合、基準の喫水状態の時、波長/船幅が4.0付近で透過率が零になっているが、この点は、上下揺固有周期に対応している。したがって、喫水が浅くなると、上下揺固有周期が短くなるため、この透過率が零となる点も、波長の短い方に移動し、逆に喫水が深くなると、波長の長い方に移動する。

双胴型に対する基準の喫水状態の場合、透過率が零になる点が3点見られる。これらの点は、波長が短い方から順に、双胴間における水の左右動、上下動及び船体の上下揺のそれぞれの固有周期に対応している。したがって、喫水が浅くなると、双胴間の水の上下動及び船体の上下揺の固有周期が短くなるため、これらに対応する透過率が零となる点も、波長の短い方に移動し、逆に喫水が深くなると、波長の長い方に移動する。

2-3. 2次元水槽試験

船体改造案に対して、消波性能の確認と係留システムの初期検討を目的とした2次元水槽試験を実施した。

(1) 試験の概要

水槽試験は、三菱重工業(株)長崎研究所の浅水域水槽の一画に設けた長さ30m、幅2m、水深1.5mの2次元水路で、水路長手方向のほぼ中央に供試模型をチェーンを用いて係留して実施した。

供試模型は、縮尺1/100とし、木製で、内部に重量、重心調整用の重錘を配置した。また、各供試模型の試験状態は、その消波性能に影響を及ぼすパラメータを変化させることとし、次のように設定した。

- ① 原 船 型 : 喫水(3状態)、重心位置(2状態)、船底フィン(2状態)
- ② 双 胴 型 : 喫水(3状態)、邪魔板寸法(3状態)
- ③ 開放ART型 : 喫水(3状態)、邪魔板寸法(3状態)
- ④ 低 反 射 型 : 喫水(1状態)
- ⑤ 振動水柱型 : 空気口の面積(2状態)

供試波は規則波とし、波高は実機換算で4m、波周期は、7s~14sの間で順次変更して消波特性を求めた。入射波と透過波は、模型設置位置の前後5mの位置で抵抗線式波高計を用いて計測した。さらに、船体の動揺(左

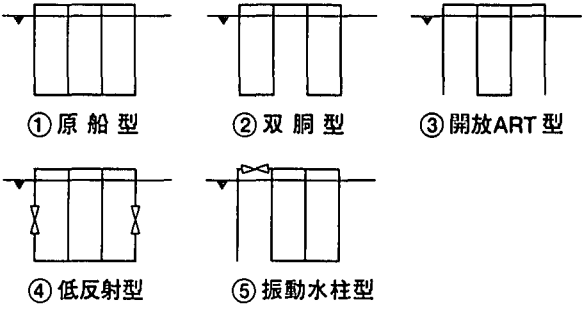


図-1 船体改造の基本形状の断面

表-1 24万トン級タンカーの主要目

船 長 L_{pp}	304.0 m
船 幅 B	52.4 m
型 深 さ D	25.7 m
喫 水 d	19.9 m
重 心 高 さ KG	13.1 m
排 水 量 ∇a	271,000 ton

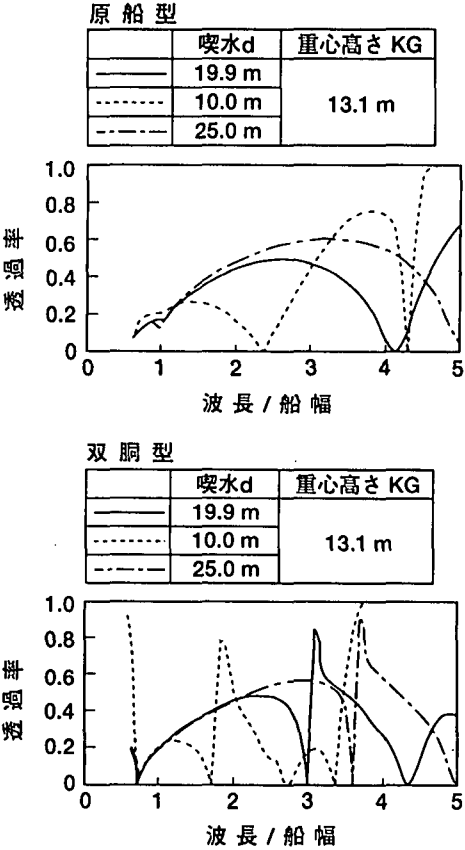


図-2 消波性能計算結果

右揺：光学式変位計，横揺：傾斜計）及び係留索の張力も計測した。

(2) 試験結果

比較的良好な消波性能を示した原船型，双胴型及び振動水柱型について試験結果を示す。

原船型の喫水，船底フィン変更試験の計測結果を図-3に示す。喫水変更試験では，先に示した消波性能計算で得られた特性と同じく，短波長域では浅喫水状態，長波長域では深喫水状態の方が，良好な消波性能を示している。消波性能計算では，透過率が零になる点は，水槽試験でも同様の傾向が認められるが，値そのものは零になっていない。これは，計算では考慮できない水の粘性影響などに基づくものと思われる。船底フィン装着の効果に関しては，フィンの大きさが大きくなる程，喫水を大きくした場合と同じ傾向が明確に認められる。

双胴型に対する喫水，邪魔板変更試験の計測結果を図-4に示す。喫水変更試験においては，原船型の場合の結果と同様の特性変化が見られる。浅い喫水では波長/船幅が3.5付近より波長が長くなるにしたがって透過率も極端に大きくなる。しかし波長/船幅が3.5以下の短波長域においては基準喫水よりも透過率は小さくなっている。邪魔板変更においては，顕著な差は見られないが，邪魔板が長くなる方が透過率が小さくなる傾向を示している。

振動水柱に対して，空気口の開口面積比を変更した計測結果を図-5に示す。開口面積比（開口面積a/タンク水線面積A）が1/300と1/75では，1/300が透過率が小さく良好な消波性能を示している。

各船型の最適状態を比較して図-6に示す。次①～④が最も良好な性能を示した。

- ① フィン長4mの船底フィンを付けたフィン付き原船型
- ② 空気口の開口面積比を1/300とした振動水柱型
- ③ 船底開口部に幅12.6mの邪魔板を付けた邪魔板付き双胴型
- ④ 船底開口部に幅13.8mの邪魔板を付けた邪魔板付き開放ART型

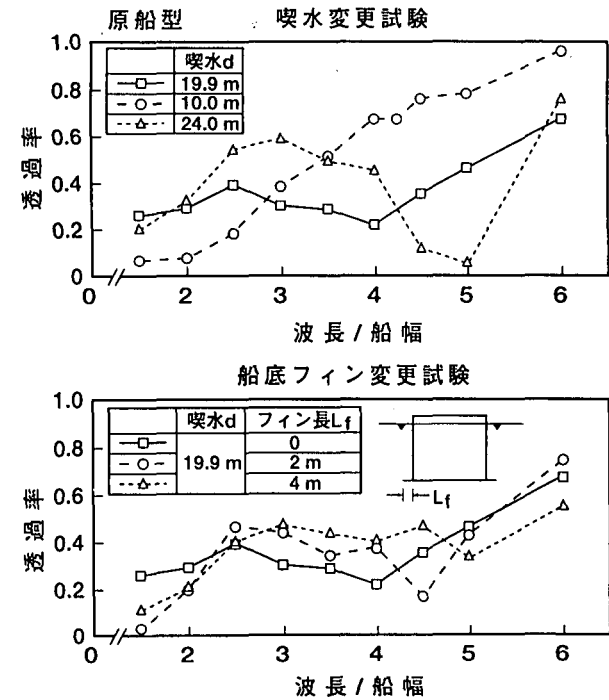


図-3 2次元水槽試験結果（原船型）

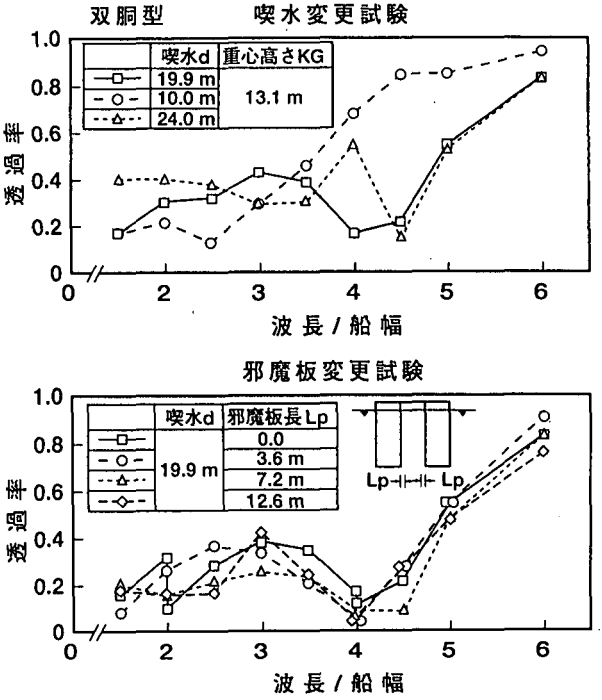


図-4 2次元水槽試験結果（双胴型）

(3) 不規則波中の透過率計算結果

規則波中試験結果より線形重ね合わせの理論に基づいて求めた不規則波中での最適状態における透過率の比較を図-7に示す。消波性能の目標値（有義波周期 $T_{1/3} = 12.0s$ において，透過率 $C_T \leq 0.5$ ）を満足しているのは，振動水柱型，双胴型，原船型の3船型である。

有義波周期 $T_{1/3} = 12.0$ より短い波周期領域において，これらの3船型の透過率を比較評価した場合，原船型は他の2船型より，若干劣るようである。振動水柱型と双胴型については，有義波周期 $T_{1/3} = 10s$ を境にして，短波長域では双胴型，長波長域では振動水柱型が優れており，全体的には，ほぼ同等の消波性能と言えよう。

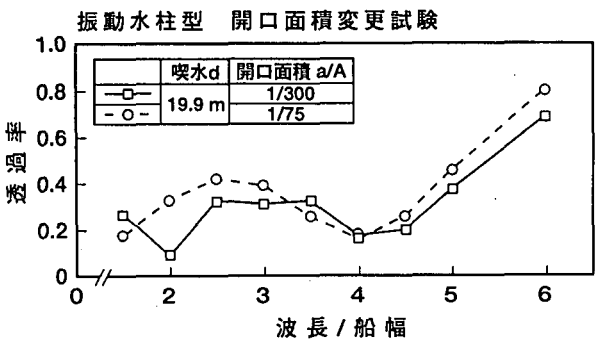


図-5 2次元水槽試験結果（振動水柱型）

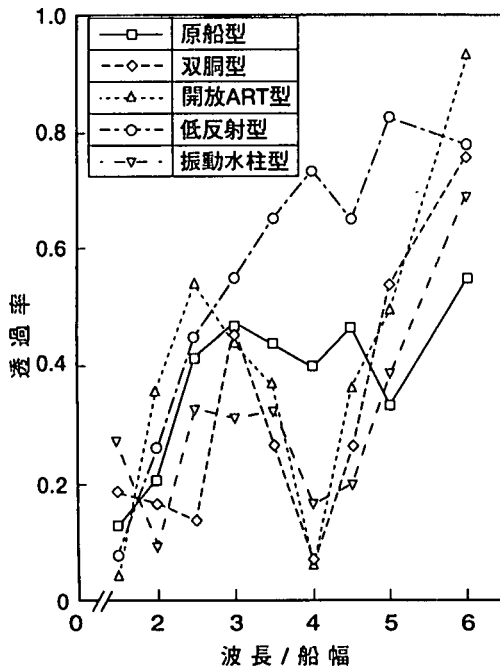


図-6 規則波中透過率の船型比較

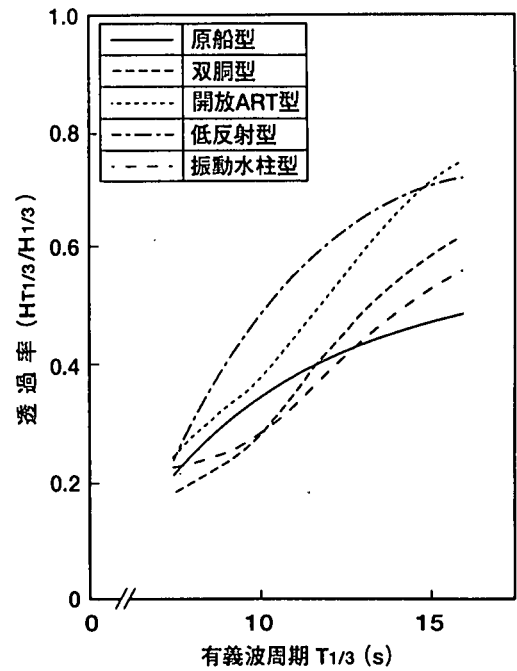


図-7 不規則波中透過率の船型比較

3. 浮防波堤の配置

浮防波堤が複数基配置された状態における堤体背後の海域の静穏度に対する、浮防波堤の基数及び配置方法の影響について調査した。

3-1. 浮防波堤の配置の形態

浮防波堤の基本的な配置の形態としては、図-8に示す2種が考えられる。

① 直列配置

浮防波堤を一直線上に配置するものである。この方法は設置工事も簡単であり、最も一般的な配置の方法である。この場合、堤体相互の衝突の危険を避けるため、堤体間にある程度の隙間を設ける必要がある。

② 千鳥配置

浮防波堤を左右交互に配置するもので、浮防波堤設置領域内を、作業船などが横切ることができる。

3-2. 3次元水槽試験

(1) 試験の概要

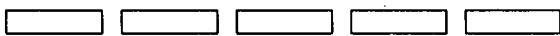
本試験は、三菱重工業(株)長崎研究所の浅水域水槽(長さ60m, 幅30m)において実施した。試験配置を図-9に示す。

供試模型は、VLCCの船首部をカットし、船体を振動水柱型構造とした。縮尺は1/80とし、木製模型で、内部に重量、重心調整用の重錘を配置した。

堤体配置は、直列配置と千鳥配置とし、堤体間隔を直列配置の場合は36m, 52m, 千鳥配置の場合は0, 52mと、それぞれ2種変更した。

供試波は、Bretschneider-光易スペクトルを有する不規則波とし、有義波周期を8s, 10s, 12sと変更した。波方向は90°(真横波)と60°とした。

● 直列配置



● 千鳥配置

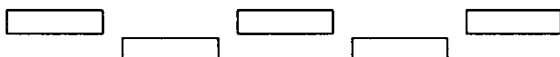


図-8 浮防波堤の基本配置

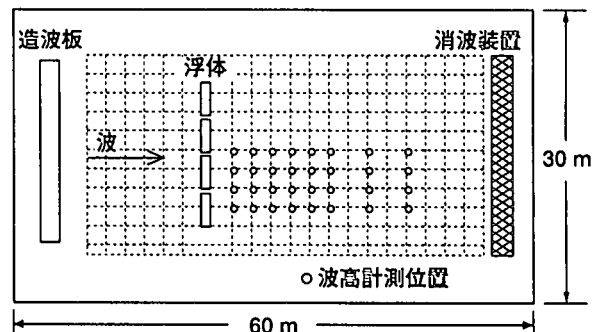


図-9 3次元水槽試験配置

波高は、透過波を堤体背後の領域において30点、入射波を堤体前面で2点について計測した。また、堤体の動揺及び係留索の張力も計測した。

(2) 試験結果

① 堤体からの距離の影響

試験結果の一例として、直列配置において、堤体からの距離をベースに、同じ距離で計測された4点の有義波高を平均し、透過率として図-10に示す。堤体直後より距離が遠くなるにしたがって透過波高は小さくなる傾向にある。これは、堤体の隙間より波が進入してくる波が堤体直後で高い波高を示すことと、堤体端部からの波の回り込みが非常に少ないためと思われる。透過率は、波長によって差があるが、有義波周期12sを例にとれば、堤体直後で0.4、距離1,000mの海面では、0.3程度である。

水槽試験の状態に対応する静穏度シミュレーション計算を実施し、その結果を図-11に示す。計算は、堤体による回折波と堤体からの透過波を重ね合わせ、回折波は、半無限堤による波の回折計算の重ね合わせで求め、透過波は浮防波堤を透過率と同じ値の反射率を有する島堤と見なし、鐘像方向からの入射波が来る場合と等価と見なして求めた⁹⁾。透過率の堤体からの距離に対する傾向、波周期に対する傾向のいずれも、実用上十分な精度で両者がよい一致度を示していることが確認できる。

② 堤体間の隙間影響

直列配置の隙間影響を図-12に示す。堤体の後方100mでは、隙間が小さい36mの方が52mより透過率で約0.1程度小さい。堤体からの距離が遠くなるにしたがって、その差は小さくなり約800mの位置で同程度となる。

③ 堤体配置影響

実現可能な配置として、直列配置(隙間36m)と千鳥配置(隙間0)を比較して図-13に示す。千鳥配置は、堤体の間隔を小さくできることにより、波方向90°に対しては、直列配置よりも有利であり、透過率が小さい。

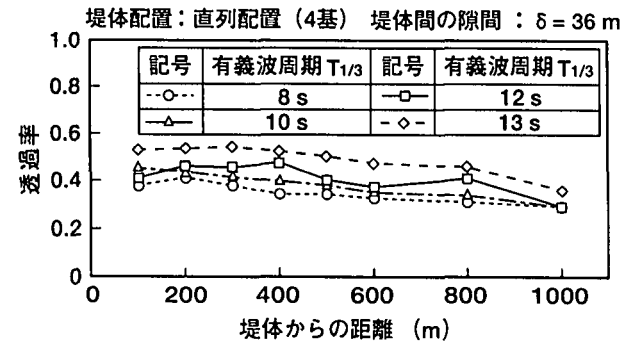


図-10 3次元水槽試験透過波高計測結果

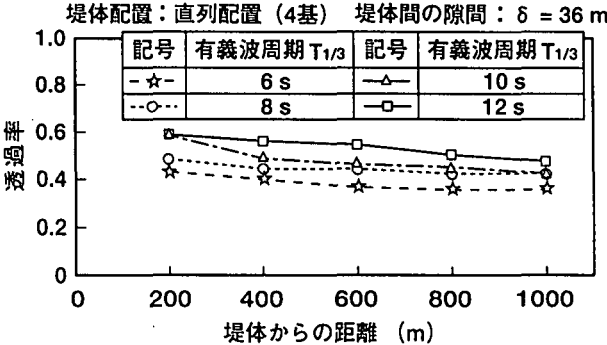


図-11 静穏度シミュレーション計算結果

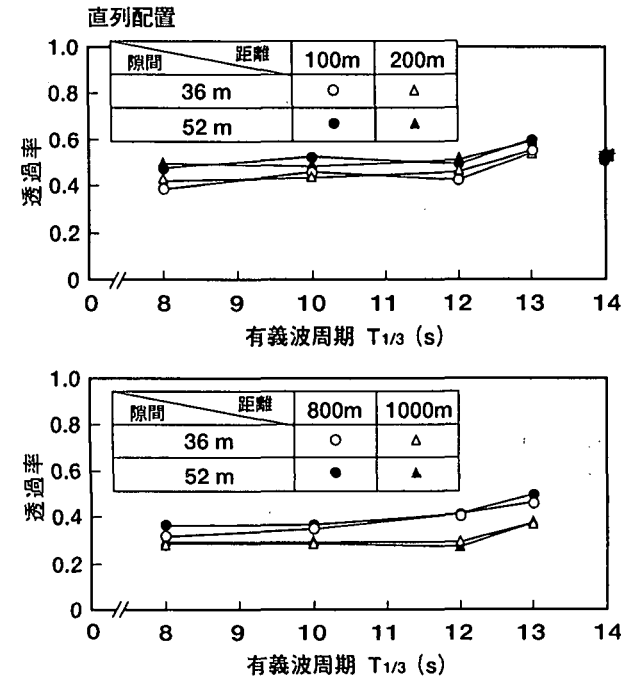


図-12 堤体間隙間影響（直列配置）

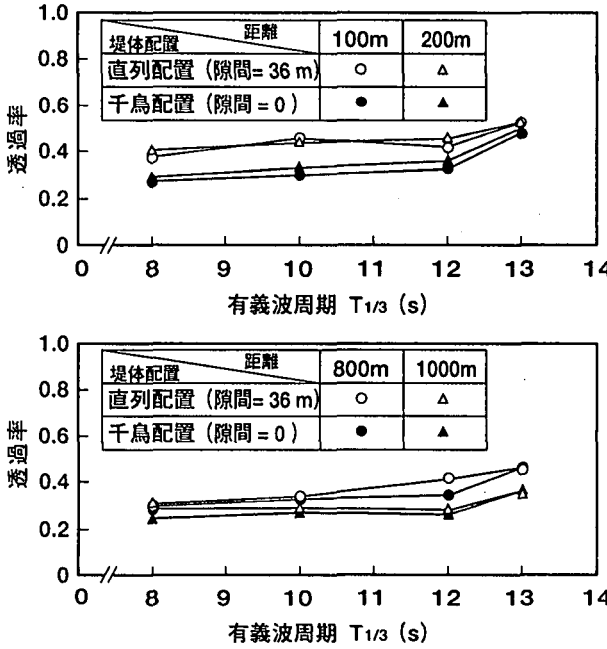


図-13 堤体配置影響

4. 実用性の検討

4-1. 稼働率の評価

比較的うねりの出現頻度の高い海域を対象に、VLCCによる浮防波堤を利用した場合の作業船の稼働率の評価を行った。

通常の港湾工事に使用される作業船の移動限界を有義波高 $H_{1/3} < 0.5\text{m}$ とし、水槽試験より得られた浮防波堤の消波性能と想定海域の波高・周期別度数分布データから推定した結果を表-2に示す。

一般的にうねりのある海域での作業船の稼働率が極めて悪いことを考えると、今回開発した浮防波堤を利用することによって、港湾工事に使用する通常の作業船の稼働率を飛躍的に向上できることが明らかになった。

4-2. 経済性の評価

今回の研究では、定量的な経済性の評価を行うには至らなかったが、仮に中古VLCCを浮防波堤に改造した場合の1m当りのコストを15百万円程度と概算すると、通常の作業船を使用して工事を施工する場合の作業船の稼働率を5~20%の中間とした場合、複数の仮設浮防波堤を設置することによって、十分な経済性を確保できることを確認した。

表-2 稼働率の推定値

通 年	72.8 %
冬	75.5 %
春	62.9 %
夏	83.9 %
秋	71.5 %

5. おわりに

本研究の成果をまとめると次のようになる。

- ① 中古VLCCを浮防波堤として利用する効果的な船体改造として、振動水柱型と双胴型の2種を案出した。
- ② 浮防波堤を複数基配置した場合の堤体背後の海域の静穏度に対する堤体配置の影響を明らかにした。
- ③ 浮防波堤に対する静穏度解析の妥当性を水槽試験により確認した。
- ④ 中古VLCCを利用した浮防波堤を設置することにより、作業船の稼働率を飛躍的に向上できる見通しを得た。

また、本論文では、報告することができなかったが、本研究では、大規模な堤体の係留システムとして、強化繊維ロープとチェーンによる複合係留索方式を提案し、その安全性を水槽試験により確認した。さらに、船体改造工事や曳航、設置工事などの具体的施工法に関する検討も実施した。

本研究の成果に基づき、沖合人工島の造成など次世代に向けた港湾工事の進歩にこの工法が貢献することを心から期待している。

本研究は、(財)日本船舶振興会の補助を受け、(社)日本作業船協会で実施された「中古VLCC利用による外海工事に用いる仮設浮防波堤の研究」の一部である。本研究を進めに当り、お世話になりました(財)日本船舶振興会及び(社)日本作業船協会の関係各位に厚くお礼申し上げます。また、有益な御討論を頂いた特定技術委員会の委員各位に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

1) ECOR 日本委員会, 浮消波堤の沿革に関する報告書(1985)
2) 日本船用機器開発協会, 大型浮遊式海洋構造物の調査研究事業報告書(1991)
3) 大楠 丹ほか, 内部自由水を利用する浮消波堤の消波性能に関する研究, 日本造船学会論文集 第169号(1991)
4) 池上国広ほか, 外海型浮消波堤の開発, 三菱重工技報 Vol. 31, No.1 (1994)
5) 静 省二, なぎさ型浮消波堤, OCEAN AGE 第12巻5号(1980)
6) 加藤重一ほか, 吸収型浮き消波工—マットレス—の消波効果, 土木学会第18回海岸工学講演会講演集(1971)
7) 加藤重一ほか, シート型浮防波堤の消波効果について, 土木学会第16回海岸工学講演会講演集(1969)
8) 別所正利ほか, 波の全反射について, 日本造船学会論文集第151号(1982)
9) 高山知司ほか, 不規則波の回折計算, 第24回海岸工学講演会講演集(1977)