

浮防波堤の配置方法と波浪制御効果 に関する研究

STUDY ON PERFORMANCE OF FLOATING BREAKWATER AND ITS NEW ARRANGEMENT

中村孝幸¹・水谷法美²・許東秀³・金度三⁴

Takayuki NAKAMURA, Norimi MIZUTANI, Dong-Soo HUR and Do-Sam KIM

¹正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

²正会員 工博 名古屋大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 博(工) 名古屋大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

⁴正会員 博(工) 韓国海洋大学校工科大学副教授 土木環境システム工学部 (〒606-791 釜山市影島区東三洞)

Dynamic responses of two-dimensional and three-dimensional floating breakwaters have been discussed based on laboratory experiments and numerical analysis. Two- and three-dimensional experiments have been conducted to investigate the dynamic behavior of floating unit for the floating breakwater. Wave height distributions have also been measured in the experiments. The new type of floating breakwater arrangement has been proposed in this study. Performance of proposed breakwater has been investigated. Numerical analysis has been carried out for both two- and three-dimensional wave-floating breakwater interactions and validations of the analysis have been examined. Results show that the numerical analysis gives fairly good estimation of breakwater dynamics and wave deformation due to breakwater. The floating breakwater arranged by the newly proposed method has been confirmed to reduce wave height behind the breakwater more than ordinal one.

Key Words : *Floating breakwater, new arrangement, source distribution method, damping wave theory*

1. 緒言

瀬戸内海をはじめ、内湾域の波浪制御構造物として浮防波堤の建設機会が増加しつつある。浮防波堤は通常、複数基のユニットを並べて設置するが、その際、防波堤長軸方向に個々の浮体ユニットの長軸を一致させた直線的な配置が採用されるのが通常である。個々の浮体は係留索でその位置が定められるが、全ての浮体で同一の係留条件を採用すると隣接するユニット間で係留索が近接し、浮体の動揺に伴って接触し、破断につながる危険性がある。係留索の展張方法を変化させることはこの危険性を回避するのに有効であるが、この場合、浮体の動揺特性が変化するために、群としての浮防波堤の効果を評価するのが困難である。

一方、複数基の浮体で構成される浮防波堤を設置した場合、単体の浮体の二次元実験で評価される透過率よりも浮体間の通水部からの透過波や側方からの回折波の影響などで背後の波高は大きくなる傾向

がある。したがって、浮体間の間隔は波高伝達率の面からは狭い方が望ましいが、浮体間の衝突の危険性が増すことになる。

本研究では、これらの問題を解決しうる新しい浮防波堤のユニットの配置方法について提案する。そして、韓国で計画された浮防波堤の設計例をケーススタディとして、鉛直線グリーン関数を使った数値解析と水理模型実験の両面から、従来型の配置方法と新しい配置方法の波制御効果を考究する。

2. 水理実験

実験は、浮体の波浪応答の基本的性質を解明するための断面二次元実験と複数の浮体を群として配置した浮防波堤の波浪制御効果を検討するための三次元実験の2種類を行った。

(1) 二次元水理実験

断面二次元の水理実験を名古屋大学の片面ガラス

張り二次元造波水槽（長さ30m，幅0.7m，高さ0.95m）を使って行った。水槽の一端にはフラップ式不規則波造波装置が設置されており、他端には勾配約1/5の消波斜面が設置されている。

現地の設置条件を参考に、模型縮尺を1/25として実験条件を設定した。実験諸元は現地換算で以下のとおりである。水深 h を15mで一定とし、浮防波堤ユニットの形状を、幅 $B=7.6m$ ，高さ $D=3.4m$ ，長さ $W=17m$ （三次元実験では32m）とした。係留索は、浮体との係留点から水平方向に18mの位置に中間センサーを設置し、係留ライン長は80mとした。実験波は周期 T を10種類（2.5～7s），入射波高を各周期に対して2種類（ $H_1=0.4\sim 3m$ ）変化させた合計20種類の規則波と、周期を変化させた3種類の一方不規則波とした。不規則波はBretschneider-Mitsuyasu型スペクトルを期待スペクトルとするものである。なお、いずれも波向きは浮防波堤法線より時計回りに 38° の方向から入射するものとした。

実験では、浮防波堤前面の3カ所および、背後2カ所の水位変動、沖側の一本の係留索に作用する張力を計測すると同時に、浮体の動揺をレーザー変位計4台を使用して計測した。

(2) 三次元水理実験

浮防波堤の三次元的な波浪応答と浮防波堤背後水域の静穏度を名古屋大学の平面波浪水槽（長さ28m，有効幅8m，深さ0.8m）を使用した水理実験により計測した。三次元実験は浮防波堤群周辺の波高分布の計測と浮防波堤の波浪応答の計測に分けて行った。

a) 動揺特性

浮体の波浪応答は、大縮尺の模型実験が精度面で望ましいため一基のみの浮体を対象に1/25の縮尺で行うこととした。実験では、浮防波堤沖側での入射波の計測を行うとともに、レーザー変位計8台を使用して浮体の動揺の計測を行った。また、4本の係留索に作用する係留張力の計測もリングゲージによる張力計4台を使用して同時に行った。なお、係留索は45度の角度で設置したが、それ以外の係留索の状況は二次元実験と同様とした。

b) 波高分布

浮防波堤周辺の波高分布を模型縮尺1/50の実験により計測した。浮防波堤は32mのユニットを4mの開口幅で7基設置して作成した。浮防波堤背後地の地形はベニア板で作成した鉛直壁で再現することとした。この際、反射率が0.6～0.7程度になるよう鉛直壁にスリットを設けた。浮防波堤は各浮体の長軸が浮防波堤全体の中心軸に一致する直線配置と各浮体の長軸を傾けた傾斜配置の2種類を対象とした。それぞれの配置の概要を図-1に示す。また、直線配置の浮防波堤の設置状況と背後地形の設置概要を図-2に示す。実験では、台車に固定したアングル鋼材に50cm間隔で6台の波高計を浮防波堤に平行に設置し、その台車の位置を波進行方向に50cm間隔で変化させて計測した。計測位置を図-2に示した。実験では浮防波堤の沖側の2カ所の固定点での水位変動も同時

に計測しており、これらの記録から全ての実験結果の位相を合わせることができる。なお、図-2の長さは現地スケールで示してある。また、これ以降も縮尺の異なる実験結果を統一的に示すため、現地スケールの物理量で表示することとする。

以上の全ての実験に対して静水状態から計測を開始し、時間間隔10ms，データ数4000個（不規則波の場合9000個）でAD変換したものをパソコンに収録した。

3. 数値解析

浮防波堤による波浪制御機能を数値解析を行って議論した。数値解析手法には、中村ら¹⁾による鉛直線グリーン関数法に基づく数値解析法を用いた。この方法は、基本的には不透過堤に対する結果に浮防波堤からの透過波の影響を線形的に重ね合わせるという近似的な取り扱いにより、浮防波堤を含む港湾域の波高分布の算定法を展開するものである。このとき、浮防波堤による波浪の制御特性は、透過率および反射率などで表されることになる。

上記の計算で必要とされる透過率と反射率を上述の水理実験と中村・井出²⁾による減衰波理論による数値解析を併用して求めた。

4. 二次元浮体の波浪応答

図-3に、二次元実験によって得られた浮防波堤の

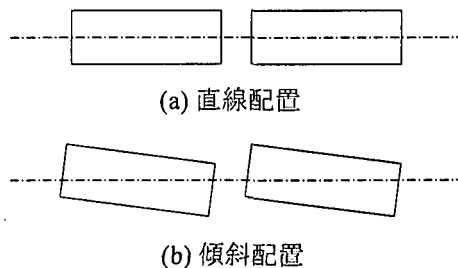


図-1 浮防波堤の配置方法

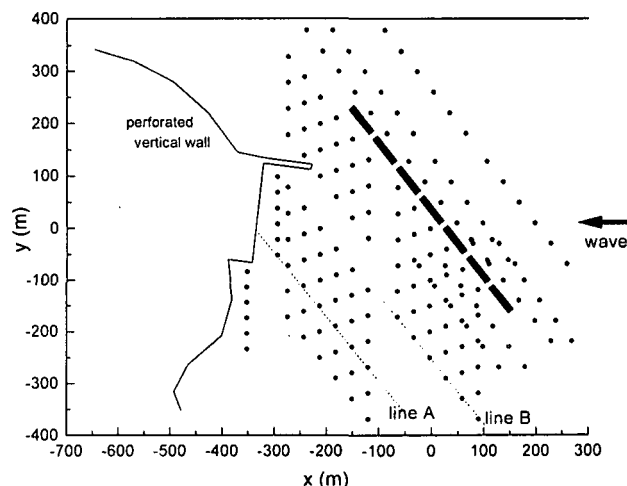


図-2 浮防波堤と背後地形および波高計測位置

透過率 C_t と反射率 C_r の入射波周期に伴う変動特性を示す。なお、実験値は岩田・清野による三点法³⁾により求めた。図中には、等価線形抵抗係数 f_c にその推奨値0.1を使用した場合の減衰波理論²⁾による算定結果も示してある。この理論値は実験と同様に4本のチェーンによるカテナリー係留を考慮し、さらに波漂流力ともなう浮体の変位によるバネ定数の変化も考慮されている。さらに、係留ラインの運動摩擦による構造減衰力の効果も考慮されている。

図より、透過・反射率の算定結果は、実験結果のそれらの複雑な変動特性をよく再現していると思なせる。特に透過率については、現地波周期の $T=3.9s$ 付近で極小となる傾向など、工学的に重要な現象をうまく再現できている。また、 $T=4\sim 5s$ で反射率が

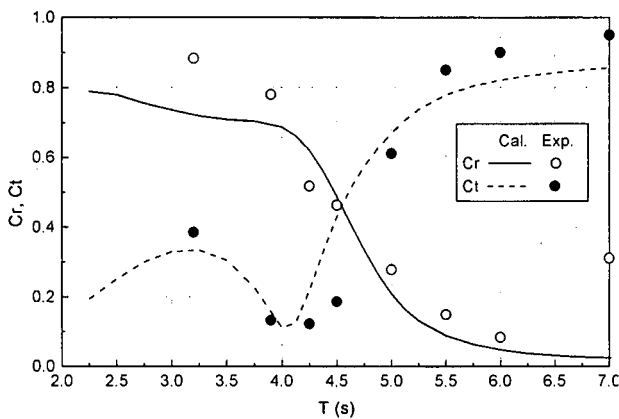


図-3 二次元浮体の反射率と透過率

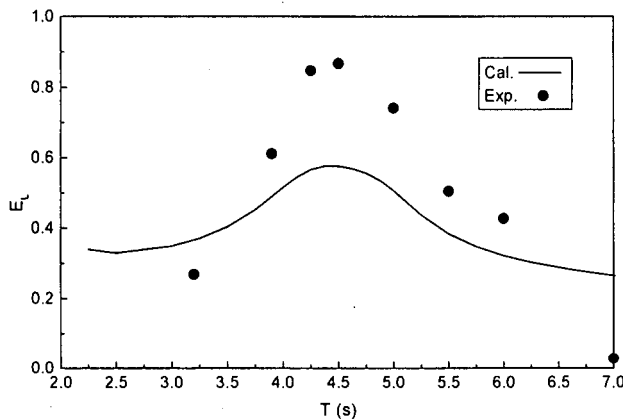


図-4 二次元浮体によるエネルギー損失

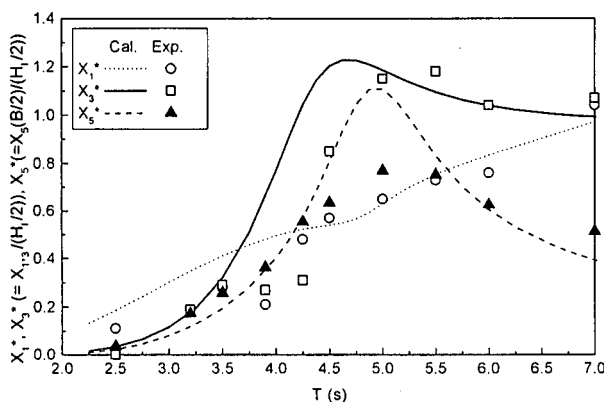


図-5 二次元浮体の動揺特性

急激に減少するとともに、透過率は急激に増大する。これは後述の浮体の動揺特性による。

図-4に、透過・反射率から求められる波のエネルギー逸散率 E_L の入射波周期に伴う変動特性を示す。この図から、逸散率 E_L の実験結果は、図-3に示した透過率が極小となる入射波の周期帯で極大になることがわかる。この周期帯では、heaveとrollの共振モードに近いことから動揺量が大きく、したがって矩形浮体の隅角部付近で渦流れが発生しやすくなっており、渦の減衰に伴うエネルギー逸散が大きく寄与していると考えられる。そして、このような条件下では、位相干渉に加えて渦の発生に伴うエネルギー逸散も加わって透過率も反射率も同時に比較的低下することが理解される。

図-5に、二次元水理実験により測定した浮防波堤の動揺変位と現地波周期との関係を示す。中村・井出²⁾の理論に基づく算定結果についても図中に示してある。

同図より、sway (X_1)は、波周期と共に増大する傾向やheave (X_3)は $T=4.5s$ あたりで最大となり、その後長周期になると作用波高程度になることが分かる。一方、roll (X_2)は、 $T=5s$ 付近で極大となり、その後順次低下する傾向が見られる。上述の $T=4\sim 5s$ はこのようにheaveやrollの共振周期に近くなっており、動揺ともなう発生する発散波と反射波・透過波の位相干渉により周期の前後で浮体の波浪制御機能が大きく変化することになる。

5. 浮防波堤の三次元波浪動揺と波浪制御

図-6は、設計波である現地換算周期 $T=3.9s$ の入射波に対して、直線配置の浮防波堤周辺の波高分布の実験結果を示したものである。図-4より二次元実験

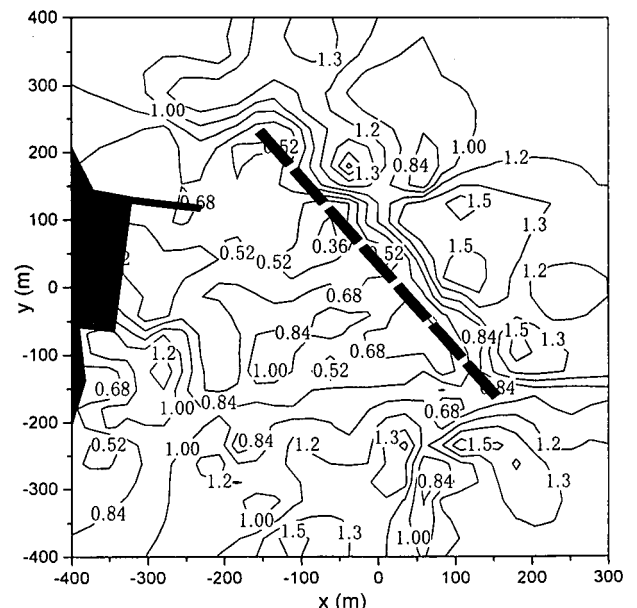


図-6 浮防波堤周辺の波高分布の実験結果 (直線配置, 規則波, $T=3.9s$)

におけるこの周期での透過率がほぼ $C_t=0.15$ であることを考えると、群としての浮防波堤の波浪制御効果は二次元の場合と比べて低下していると判断できる。ここで、三次元の場合の波浪制御効果が二次元の場合に比べて低下している原因として以下のものが挙げられる。

- ①浮防波堤の開口部からの透過波
- ②浮体の動揺特性の変化
- ③発散波の特性の差

これらのうち、①の開口部は、浮体を群として設置する限り不可欠であり、ここからの波の透過を減らすことは静穏度確保の面からは工学的に極めて重要な課題である。これについては後述することとする。

つぎに②の動揺特性の変化について考察する。三次元浮体の動揺特性について、三次元実験により得られた実験結果と三次元の浮体の波浪応答計算結果を図-7と図-8に示す。なお、図-7には並進運動であるsway (X_1), surge (X_2), heave (X_3)を図-8には回転運動であるpitch (X_4), roll (X_5), yaw (X_6)を示す。計算はGarrisonら⁴⁾の三次元湧出分布法に基づいて行われているが、二次元の場合と同様、浮体の6自由度の運動に対してチェーン等による構造減衰が考慮されている。また、実験は浮体の法線に対して 38° の角度を持つ斜め入射波で行っているが、計算では比較のため法線方向からの入射波に対しても行っており、その結果も合わせて示してある。

直角入射の場合の三次元計算結果を図-5に示す二次元計算結果と比較するとほぼ同様の波浪応答結果

が得られている。さらに、斜め入射に対する水理実験結果との比較より、並進運動の長周期側に差が認められるものの特に回転運動で良好な再現性が確認でき、本計算手法の有効性が確認できる。

二次元実験の結果と同様に、静的復元力が作用する回転動揺変位のうち、rollは二次元の場合と同様に5s付近に共振周期をもつ。一方、慣性半径の大きいpitchにはrollのような明確な共振周期は現れないが、 $T=4\sim 6s$ 付近にかけてなだらかな極大値が現れる。

二次元の場合と比べると、本研究で対象とする斜め入射の場合、rollの運動振幅がかなり小さくなる。これは、浮体長軸方向に波の位相が異なるためである。そのため、逆に長軸方向の振動モードであるpitchの動揺がかなり大きくなっている。二次元実験の浮体の動揺と波変形で既述したように、浮体の共振周期近傍で波浪制御効果が高くなるのは、透過波と発散波の位相干渉による。この位相干渉が効果的に発揮されるためには、透過波と発散波が一定の位相関係を保持している必要がある。二次元実験の場合、発散波は平面波であり、波の進行とともに振幅は減衰しない。しかもその進行方向は浮体背後では透過波と同一であり、波速も同一である。このため、浮体背後では常に透過波と発散波は一定の位相関係を保持することになる。一方、三次元の場合、浮体の大きさが有限であるため、発散波は円筒波の重ね合わせになる。すなわち、その伝播方向は放射状に広がり、振幅は浮体から離れるにしたがって減衰する。浮体が存在することによって発生する回折散乱波も基本的には円筒波の重合したものになるが、発散波と回折散乱波の点源が若干ずれるとこれらの波の位相関係は浮体との距離にもなって変化する。すなわち、位相干渉の程度は場所によって異なることになる。これが③の原因であると考えられる。

6. 浮体の配置と浮防波堤の波浪制御効果

浮防波堤の全長、およびユニットの寸法を一定に保ちながら①の開口部からの透過波を減少させる手法として、図-1に示したようなユニットを傾斜配置させた浮防波堤の波浪制御効果を直線配置した浮防波堤の場合と比較する。本研究では、予備的な静穏度の計算から、浮体ユニットがその長軸を浮防波堤の長軸から 13 度回転させた傾斜配置の場合を対象とした。図-9に図-6と同じ波浪条件に対する波高分布の実験結果を示す。両図を比較すると、傾斜配置した場合の浮防波堤背後の波高分布は、全般的に直線配置の浮防波堤背後の波高分布に比べて小さくなっていることが確認できる。これは、波の入射方向が浮体法線に一致する場合を除くと、入射方向からみた浮体間の遊水部の幅が、直線配置の場合に比べて傾斜配置の方が見かけ上狭くなっており、このため、遊水部からの入射波が減少することが一原因として

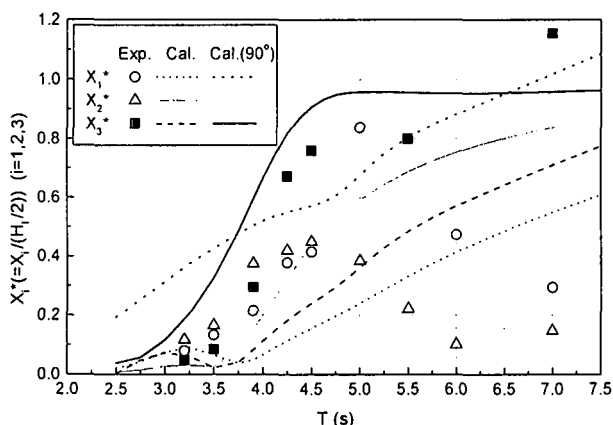


図-7 三次元浮体の動揺特性（並進運動）

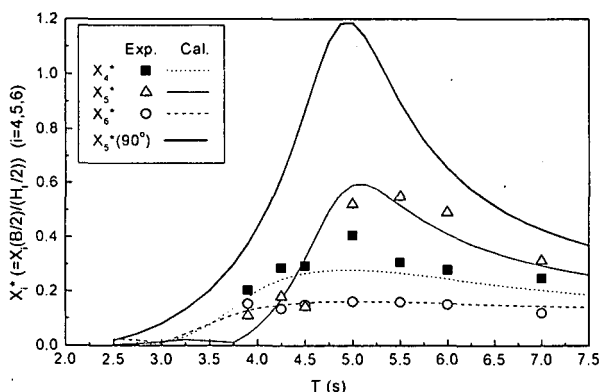


図-8 三次元浮体の動揺特性（回転運動）

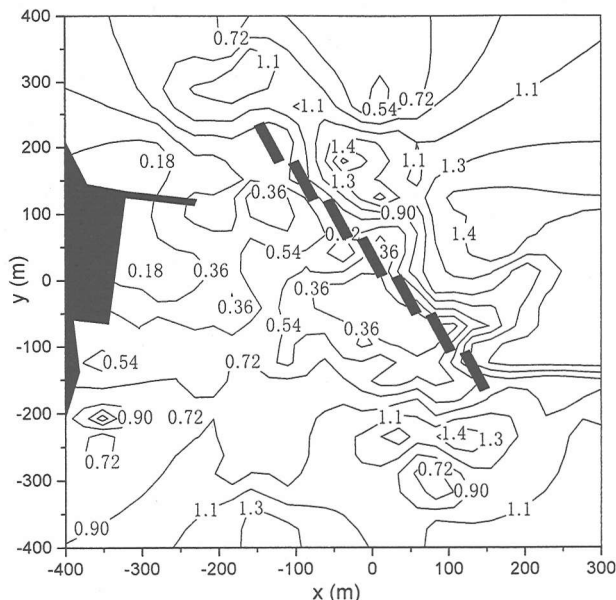


図-9 浮防波堤周辺の波高分布 H/H_1 の実験結果
(傾斜配置, 規則波, $T=3.9s$)

考えられる。

実験値は計測ポイント数に限界があるため、数値解析結果から波高分布について考察する。まず、数値解析結果と実験結果の比較を図-10と図-11に例示する。それぞれ図-2に示したAとBの測線での値であり、Aは浮防波堤背後の水域、Bは浮防波堤端部の水域である。図よりいずれの場所においても両者

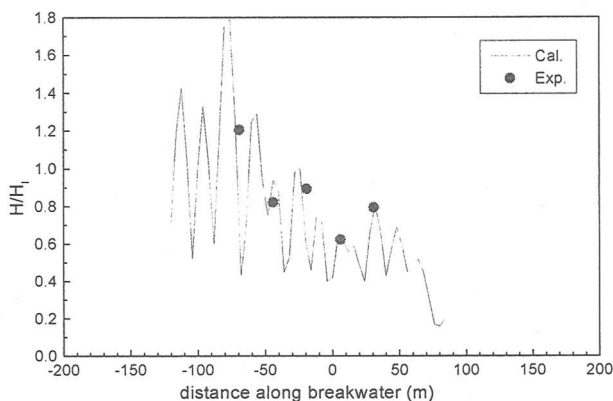


図-10 浮防波堤周辺の波高分布 H/H_1 の比較例
(直線配置, 規則波, $T=3.9s$, 測線A)

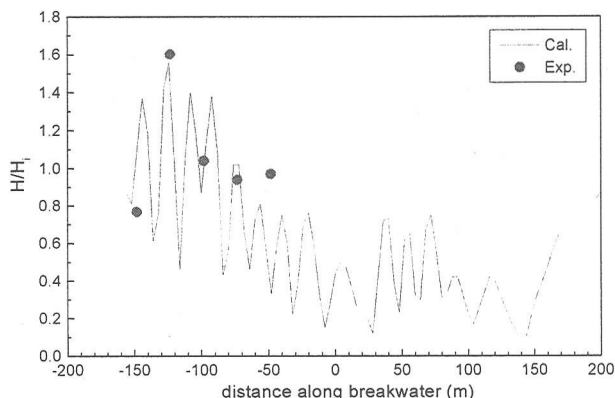


図-11 浮防波堤周辺の波高分布 H/H_1 の比較例
(直線配置, 規則波, $T=3.9s$, 測線B)

の対応は良好であり、浮防波堤背後のみならず端部から回折波が背後領域に回折してくる現象をも数値解析は妥当に再現しているとみなせる。図-12と図-13はこの数値解析により直線配置と傾斜配置の波高分布を計算した結果を示すものである。全般的に浮防波堤背後では直線配置に比べて傾斜配置の方が静穏度が高いことが認められる。紙面の都合上、図が小さいが、浮体ユニット間の開口部に着目すると、傾斜配置の方が波高が小さく、開口部からの透過波を軽減していることが確かめられる。

本研究では斜め入射波を対象に検討を加えているが、波の入射方向が浮体の法線と一致した場合、各浮体の長軸が同一線上になく、したがって、波が各浮体ユニットに当たる時の位相が一定でない。このため、遊水部で回折散乱波間の位相干渉も期待できるが、この点については別途検討する予定である。

図-14と図-15に不規則波における波高分布の計測結果を有義波高の無次元値 $H_{1/3}/H_1$ で例示する。これらは共に規則波の図と同様、現地換算周期 $T=3.9s$ の場合である。規則波の場合と比べて入射方向からみて防波堤の左側に波高の高い部分が見られるが、こ

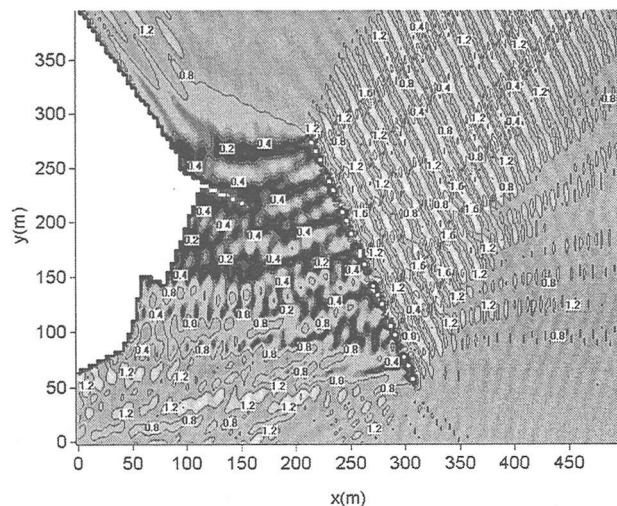


図-12 浮防波堤周辺の波高分布 H/H_1 の計算結果
(直線配置, 規則波, $T=3.9s$)

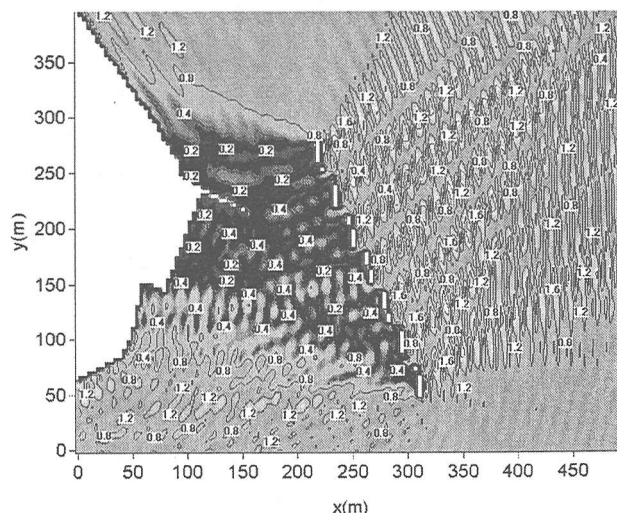


図-13 浮防波堤周辺の波高分布 H/H_1 の計算結果
(傾斜配置, 規則波, $T=3.9s$)

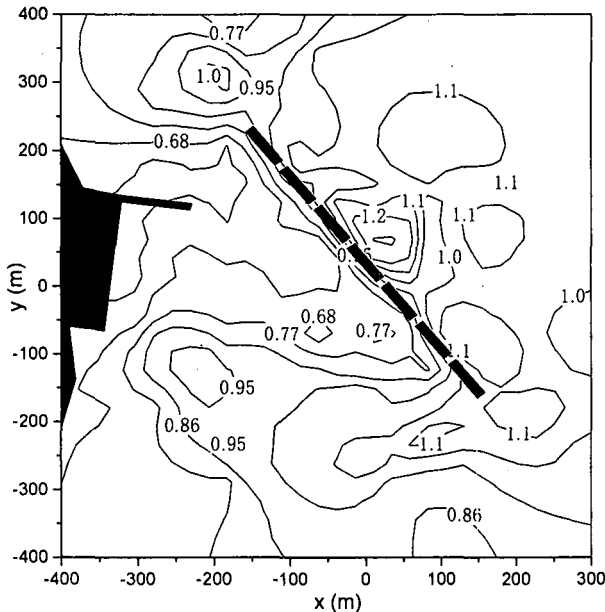


図-14 浮防波堤周辺の波高分布 $H_{1/3}/H_1$ の実験結果
(直線配置, 不規則波, $T_{1/3}=3.9s$)

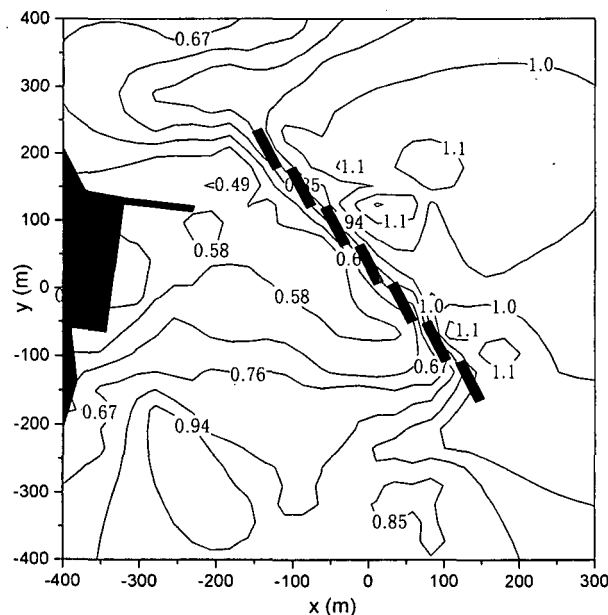


図-15 浮防波堤周辺の波高分布 $H_{1/3}/H_1$ の実験結果
(傾斜配置, 不規則波, $T_{1/3}=3.9s$)

これは不規則波が回折効果の高い短周期成分の波も含んでいるため、浮防波堤の端部から回折した波が影響しているものと考えられる。しかし、直線配置と傾斜配置を比較した場合、浮防波堤背後の波高は一般的に傾斜配置のほうが若干小さくなっていることがわかる。したがって、不規則波の場合も直線配置よりも傾斜配置の方がより高い静穏度が達成されると言えそうである。

ところで、浮防波堤の各浮体の係留索は、長軸方向にも角度を持って展張される。この際、各浮体に対して同様の展張方法を採用すると、直線配置した浮防波堤では隣接する浮体間で係留索が接触するおそれがある。この係留索の接触に関しては、既に実例が報告されており、頻繁に接触した係留索が切断

し、動揺量が増大した浮体が衝突して最終的に沈没している。このため、係留索にゴムなどによる特殊な耐摩耗工が設置されたり、隣接する浮体間で係留索の展張方法を変化させたりする必要がある。係留索の展張方法を変化させると浮体の動揺特性が変化するため、設計面ではかなり面倒になる。これに対して、傾斜配置した浮防波堤では、その幾何学的特徴から隣接する浮体間の係留索が基本的に交点を持たない配置となる。したがって、係留索の安全面からも利点のある配置と言える。

7. 結言

本論では浮防波堤の波浪応答特性と波浪制御効果を議論しながら、より高い静穏効果の得られる浮体ユニットの配置方法について考究した。得られた主要な結論を列挙すれば以下のようなものである。

- 1) 減衰波理論を使用した数値解析に構造減衰を考慮した数値解析により二次元波動場、および三次元波動場に置かれた浮体の波浪応答を良好に推算可能であることが確認された。
- 2) 浮防波堤による波変形を三次元で考えると、各浮体間の遊水部からの透過波や、浮体の運動によって発生する発散波の三次元性の影響により、二次元実験で評価された透過率が必ずしも達成されず、部分的に背後の波高は二次元実験に比べて大きくなる。
- 3) 浮防波堤に斜めに波が入射する場合、本研究で提案した傾斜配置を採用した浮防波堤は、従来の直線配置と比較して、より高い静穏度が達成される。また、傾斜配置はその幾何学的特徴から隣接する各浮体の係留索の安全性の面からもより有利な配置であると言える。

謝辞：本研究の数値計算と水理実験を行うにあたり、愛媛大学大学院の飯干富広君、名古屋大学大学院の牛木賢司君、田原隆君に多大な協力を賜った。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 中村孝幸・佐伯信哉：透過堤を含む港湾域の波高分布の算定法に関する研究、海洋開発論文集、第15巻、pp.339-344, 1999.
- 2) 中村孝幸・井出善彦：減衰波中における浮体の動揺理論とその適用性に関する研究、海岸工学論文集、第44巻、pp.856~860, 1997.
- 3) 岩田好一朗・清野博：部分重複波の砕波限界に関する実験的研究、海岸工学論文集、第30巻、pp.1-4, 1983.
- 4) Garrison, C.J., Totum, A., Iverson, C., Leviseth, S., and Ebbesmeyer, C.C. : Wave Forces on Large Volume Structures - A Comparison between Theory and Model Tests, Proc. Offshore Tech. Conf., Paper No.OTC2137, 1974.