

ダブルバリア型浮消波堤の波浪減衰メカニズムとその現地有効性の検証

Wave energy dissipation mechanisms of the double barrier floating breakwater

外村隆臣¹・江島隆晃²・今村格³・津嶋了⁴・辻本剛三⁵・由比政年⁶・沖和哉⁷・山田文彦⁸

Takaomi HOKAMURA, Takaaki EJIMA, Itaru IMAMURA, Satoru TSUSHIMA, Gozo TSUJIMOTO,
Masatoshi YUHI, Kazuya OKI, Fumihiko YAMADA

Wave energy dissipation mechanisms of the Double Barrier Floating Breakwater (DBFB) have been examined using numerical analysis. The DBFB has a rectangular body and double vertical plates to make energy dissipation with vortex flow around the tip of plates. In the field observations, transmitted wave heights behind the breakwater were reduced during storm conditions. The numerical model solves two-dimensional, unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes equations in the vertical plane. The $k-\epsilon$ turbulent model is also used for the computation of Reynolds stresses as well as the Volume Of Fluid method for tracking the variation of the free surface. The attached plate at the both side of floating body significantly enhances the efficiency of the floating body.

1. はじめに

防波堤で保護された漁港・マリーナ等の小規模な閉鎖性水域内における最近の維持管理上の問題点は、大きく以下の3つに分類できる。

- 1) 沖からの進入波や航走波、また、台風等の異常気象に伴う高波浪により、港内静穏度が低下し、係留船の破損や稼働率が低下している。
- 2) 港内の海水交換能力が低下し、水質悪化等の環境問題が深刻化している。
- 3) 活発な沿岸・岸沖漂砂によって、航路や港内が埋没し、維持浚渫等のランニングコストが増大している。

これら問題を一気に解決する対応策は確立されておらず、個別に対策を行っているのが現状である。例えば、

1), 2)の問題に対しては、潜堤など海水交換が自由に行える没水型構造物の活用が見直されている(例えば、川崎; 1998)。しかし、これらの消波機構は構造物天端上での水深急変に伴う砕波変形によるエネルギー逸散に大きく依存するので、今後予想される海面上昇に伴って構造物天端上の水深が大きくなると、その効果は減少する。また、一定の消波効果を維持するためには、必然的に大断面構造物となり、建設コストの増大という新たな問題が生じる。

中山ら(2006)は、港内埋没が長周期波に伴う大規模渦によって浮遊砂として港内に運ばれる事に注目し、海水を取り込んで、港内の循環流を強化し、浮遊砂を港外へと運び出す、海水導入工を提案した。この方法は、海水交換能力も必然的に高めるため、水質等の環境面からも有効な手法と考えられる。しかし、既存施設にこの手法を導入する場合は、やはり大掛かりな工事や維持管理費が必要となる。こうした中、従来の浮体構造物に消波機能などを付加した浮消波堤の活用が注目されている(中村ら, 1983, 2003; 加藤ら, 2001)。これは、浮消波堤が通常の構造物に比べ、海水交換を妨げず、また、施工費・維持管理費の面でも、既存技術より優位と考えられるためである。しかし、現段階では浮消波堤の明確な設計基準は存在しない。

一般的に浮消波堤の性能は、入射波高と浮消波堤透過後の波高との比(透過率)で評価される。具体的には、台風や季節風による異常波浪時(高波浪時)における入射波高の透過率を50%以下に抑えることができれば有効である。また、漁港やマリーナの港内静穏度として、港内の有義波高を50cm以下とする設計条件が一般的であるが、施設の耐用年数・維持管理・利用者の利便性などを考慮すると、30cm程度以下まで下げることが望ましい(例えば、日本港湾協会, 2007)。浮消波堤により入射波の透過率を下げ、港内静穏度を改善するためには、浮体幅や喫水を大きくする事で、ある程度は対応可能である。しかし、経済性や構造上の限界を考慮すると、有効な対応策とは言い難い。

Christian(2000)は浮体の矩形断面の下面中央に鉛直板を装着することで、板先端付近で剥離する渦運動を用いて入射波のエネルギーを損失させ、透過率を低下させる方法を提案した。実験水路(長さ20m, 幅0.8m, 深さ1m;

1 正 会 員 熊本大学 工学部 技術部
2 学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科
3 西田鉄工(株) 部長 マリーナ事業部
4 日技クラウン(株) 部長 海洋開発部
5 フェロー 工博 神戸市立工業高等専門学校 教授
6 正 会 員 博(工)金沢大学 教授 大学院
7 正 会 員 博(工)京都大学 助教 大学院
8 正 会 員 博(工)熊本大学 教授 大学院

規則波のみ)で検証を行った結果、浮体幅や喫水は一定のままでも、鉛直板の長さを水深に対して適切に設定すると、透過率が低減可能であることを示した。この流体と鉛直板の相互作用に伴うエネルギー損失機構については、日野・山崎(1971)、池田ら(2000)も類似の条件下で検討しており、渦運動によるエネルギー損失量を理論的に導出し、実験結果をよく再現できることを示している。

Koutandosら(2005)は、Christian(2000)の結果をさらに検討し、鉛直板の装着位置を矩形断面の下面中央から入射側の浮体側面に変更した。また、実験結果(反射率・透過率・エネルギー損失)のスケール効果を調べるために大型水路(長さ100m、幅3m、深さ5m)を使用し、規則波に加えて不規則波の実験も行った。実験に用いた浮体(矩形断面)は、1)波浪による動揺を固定したタイプ、2)鉛直方向(ヒープ)のみ動揺を許容するタイプ、3)動揺を固定し、入射側の浮体側面に鉛直板を装着したタイプ、4)動揺を固定した浮体を波の進行方向に一定間隔をあけ2列に並べたタイプの計4つである。透過率について比較すると、浮体動揺の有無による差はそれほど顕著ではなく、2列に並べたタイプが最も優れていた。しかし、経済性を考慮すると、入射側に鉛直板を装着したタイプが最適であると結論づけている。

一方、加藤ら(2001)は入射・透過側の両方の浮体側面に鉛直板を取り付けた二重鉛直板付き矩形浮体(以後、ダブルバリア型浮消波堤と表記)を提案し、室内実験と理論解析により入射波の反射率・透過率・エネルギー損失について検討した。その結果、透過率が減少するだけでなく、浮体幅波長比が0.2以上では浮体の鉛直運動(ヒープ)が著しく減少することを示した。このことは、ダブルバリア型浮消波堤が、高波浪時には防波堤として機能するとともに、平常時には作業ヤードやビジターバースとしても利用可能な空間を提供できる可能性を示している。しかし、現地での検証は行なっておらず、その適用性は未解明である。また、理論解析ではポテンシャル理論に基づいて検討を行っているが、剥離渦によるエネルギー損失が顕著となる問題に対して、その適用性には若干の疑問が残る(例えば、Koftisら、2006)。

本研究では、高波浪時だけでなく、平常時にも有効な利用方法が期待できるダブルバリア型浮消波堤に着目し、まず、高波浪時の波浪制御特性について現地観測により検証を行った。次に、室内実験を行い、対象とする周期帯の波浪に対して、浮体の動揺を固定した場合と許容した場合で、透過率にどの程度の差が生じるかを調べた。これは、粘性流体の運動方程式に基づき、浮体の動揺まで考慮した解析手法が、すでに水谷ら(2004)、Rahmanら(2006)により提案されているが、実務での検討に使用する場合を考えると計算負荷が大きいが危惧される。

そこで、浮体の動揺を無視して計算した場合の誤差や相違点を把握する目的で行った実験である。その結果より、実際の計算では、CADMAS-SURF(沿岸開発技術研究センター、2001)を用い、浮体の動揺は無視し、ダブルバリア型浮消波堤による波エネルギー減衰機構について断面2次元で検討を行った。

2. 現地観測

(1) 観測概要

観測は熊本県宇土半島北部に位置する宇土マリーナ内に既設されているダブルバリア型浮消波堤を対象に行った(図-1)。この浮消波堤の設置水深は5mであり、またこの海域の平均的な潮位差は大潮時で約4mである。浮消波堤の断面形状は図-2に示すように、幅5.7m、高さ1.0mの矩形断面の両端にバリア(鉛直板)を取り付けた構造になっており、浮体下面からのバリア先端までの長さは0.55mである。なお設計では、この浮消波堤の対象とする波浪の周波数帯は4.5s以下と想定している。観測では、ダブルバリア型浮消波堤の前後2箇所で超水圧式波高計(HJ-401、アイオーテック)により水位変動をサンプリング間隔10Hzで連続計測した。浮消波堤と波高計の距離はそれぞれ10mであり、波高計は海底面に設置した。観測期間は2006年9月7日～10月13日であり、観測期間中の特徴として、9月17日18時過ぎには台風0613が現地付近に接近した。当日の熊本港での満潮時間は18:37であり、台風接近と満潮時間が重なったため、約1mの潮位偏差が高潮により生じている。

(2) 観測結果

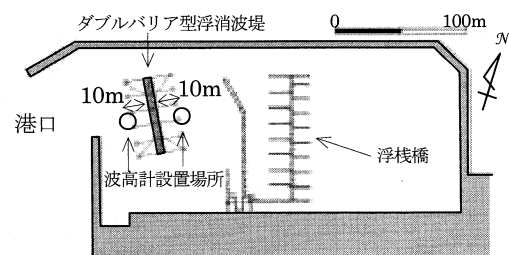


図-1 宇土マリーナ内の配置図

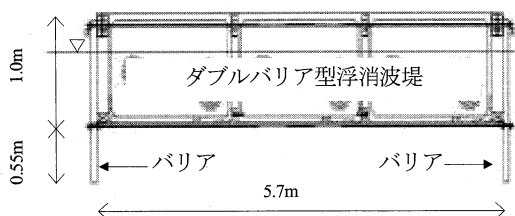


図-2 ダブルバリア型浮消波堤の断面図

写真-1に台風時の浮消波堤周辺の状況を示すが、浮消波堤前後での波浪状況の相違が目視でも確認できる。

図-3に台風時の浮消波堤前後での有義波高と透過率の時系列を示す。台風の接近とともに、マリーナ内でも有義波高の増大が顕著である。その後、台風が通過し、風の強さが弱まり、高潮が下がりつつある時点の22:00過ぎに港口側で最大の有義波高が観測されている。これは、マリーナ内への入射波と高潮の水位下降に伴う逆流との相互干渉と考えられる。ここで、台風時の透過率を算定すると0.6を上回る数値が見られているが、この計算では入射波共存場の波高を用いており、その精度には問題が残されている。そこで、今回は実質の静穏度(波高値)で評価を行った。港口側では台風の影響に伴い入射波高が増大し、50cmを超える有義波高を記録している。一方、浮消波堤背後でも同様の波高の時系列変化がみられるものの、波高の増大は港口側と比較して穏やかであり、有義波高は40cmを超えることはない。このように、現地の水深状況からバリア長に制限があったことや港内航路確保上の制約等があったにも係わらず、ダブルバリア型浮消波堤は現地において消波性能を発揮していることが確認できた。



写真-1 台風 0613 接近時の浮消波堤前後での波浪状況

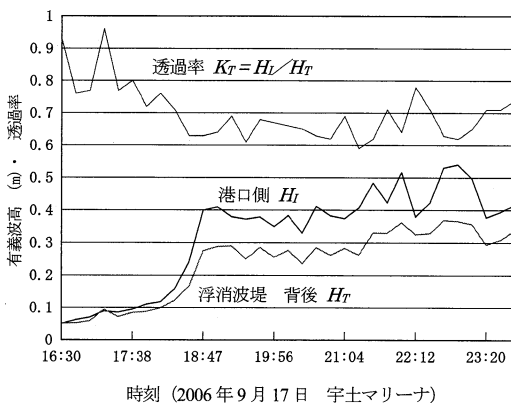


図-3 台風 0613 接近時の有義波高と透過率の時系列

3. 模型実験と数値解析

(1) 実験装置および方法

対象とする周期帯の波浪に対して、まず、浮体の動揺を固定した場合と許容した場合で、透過率にどの程度の差が生じるかを調べるために室内模型実験を行った。実験は神戸高専所有の2次元造波水路(長さ18m, 幅0.6m, 高さ0.8m)を用い、図-4のように浮消波堤模型、容量式波高計、超音波流速計を設置した。入射波と反射波を分離して反射率・通過率・エネルギー損失を算定するために、波高計は浮消波堤前面に3台、透過側に2台設置した。波高計および超音波流速計の設置位置の詳細は図中に記載した。流速は模型の前後2点で超音波流速計を用いて計測した。また、浮体周辺の流れの状況は染料を流し、可視化するとともに、ビデオカメラで録画を行った。

浮消波堤の模型縮尺は1/16であり、動揺を許容するケースでは、模型はベアリングを利用して上下方向のみスムーズに動揺する。実験は水深を変えながら、現地の波浪条件(波高・周期)を規則波で与えた(表-1)。

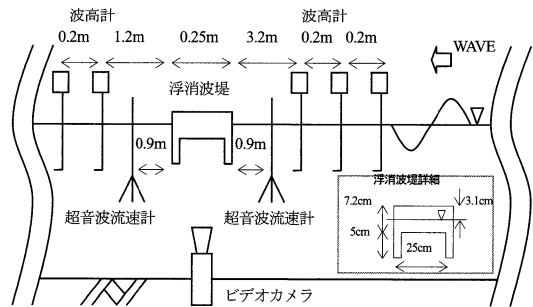


図-4 実験状況

(2) 実験結果

表-1に実験条件とともに、浮体の動揺を固定した場合と許容した場合で、透過率にどの程度の差が生じたかを比較した結果を示す。なお、反射波・透過波の波高については、合田ら(1976)の入射波分離法を用いて算定した。ケースAはH.W.L.の平常時、ケースBはH.W.L.の高波浪時、ケースCはM.S.L.の高波浪時の実験で、ともにケース名末尾の数字は1が浮体動揺有り、2が浮体動揺無しを表している。各ケースの透過率を比較すると、透過率の値は波長の増加や浮体の動揺とともに増加し、動揺を固定した場合に比較して、1~1.6倍になっている。動揺の有無が透過率等に及ぼす影響はさらなる検討が必要であるが、次の検討では両者の差が小さいケースCについて周期を変えた実験を行うとともに、CADMAS-SURFにより浮体の動揺を無視した計算等を行い、透過率を実験値と比較した。

表-1 浮体動揺の有無による透過率の比較

()内は現地スケール							
Case	水深 (m)	周期 (s)	波長 (m)	波高 (m)	浮体 動揺	透過率	透過率の比 (有/無)
A1	0.5 (8.0)	1.25 (6.0)	2.18 (34.5)	0.047 (0.75)	有	0.639	1.14
A2				無	無	0.559	
B1	0.5 (8.0)	1.25 (6.0)	2.18 (34.5)	0.078 (1.25)	有	0.811	1.56
B2				無	無	0.520	
C1	0.312 (5.0)	1.25 (6.0)	1.89 (30.2)	0.078 (1.25)	有	0.435	1.02
C2				無	無	0.425	

今回の計算には、実務での使用の簡便性なども考慮し、CADMAS-SURFを用いた。また、浮体の動揺は考慮せず、乱流モデルは $k-\epsilon$ モデルを用いた。計算領域は図-5に示すように、水平方向に22.4m、鉛直方向に0.5mとした。水平方向の格子間隔は、浮体前後の範囲で0.01m、それ以外は0.02m間隔、鉛直方向に0.01m間隔で、両端にエネルギー減衰帯を設けている。周期は、0.75s(現地換算3.0s)、0.88s(3.5s)、1.0s(4.0s)、1.25s(5.0s)、1.5s(6.0s)の5ケースをそれぞれ行った。

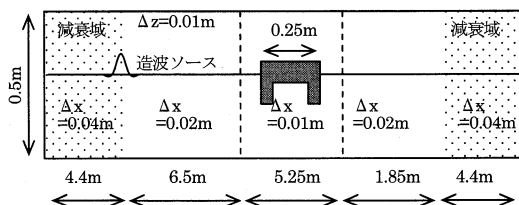


図-5 計算領域（室内実験対象）

室内実験と数値計算による透過率と堤幅波長比 B/L （浮消波堤堤幅 B 、波長 L ）の関係を比較した結果を図-6に示す。

図より $B/L=0.3$ 付近で、数値計算は実験結果を過小評価する傾向にあるが、全体的に十分な精度で実験状況を

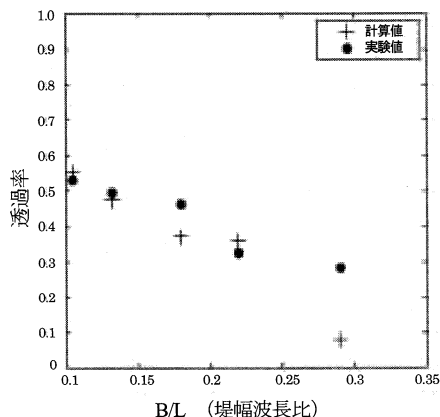


図-6 透過率と堤幅波長比の比較

再現できていることが分かる。

4. 現地を対象とした数値計算

(1) 計算条件

今回の計算には、粘性流体の運動方程式を基本とし、実務での使用の簡便性なども考慮し、CADMAS-SURFを用いた。また、浮体の動揺は考慮せず、乱流モデルは $k-\epsilon$ モデルを用いた。計算領域は図-7に示すように、水平方向に284.0m、鉛直方向に10.0mとした。水平方向の格子間隔は、浮体の範囲で0.1m、それ以外は0.2m間隔、鉛直方向に0.1m間隔で、両端にエネルギー減衰帯を設けている。計算は浮体形状を矩形型とダブルバリア型に

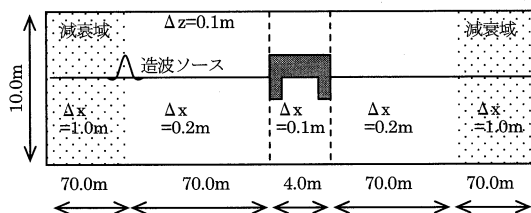


図-7 計算領域（現地対象）

表-2 計算ケース

ケース	水深(m)	周期(s)	波高(m)
1	3.0	3.0	0.5
2		3.5	
3		4.0	
4		4.5	

分け、表-2に示す4ケースをそれぞれ行った。

(2) 計算結果

図-8に矩形型浮消波堤とダブルバリア型浮消波堤の透過率の計算結果の比較を示す。計算結果も実験と同様に、合田ら(1976)の手法で入射波の波長が長くなるにつれて透過率が0.5を大きく上回るのに対し、ダブルバリア型浮消波堤では全体的に透過率が低くなっているのがわかる。また、今回は結果として図示していないが、バリア長を伸ばすことにより透過率をさらに低減できること

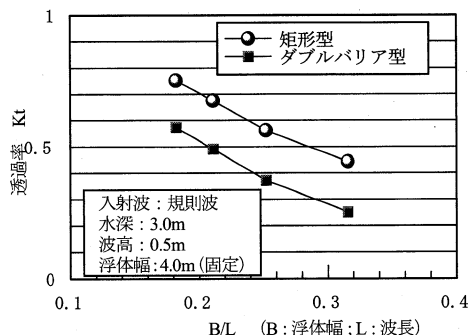


図-8 浮体形状の違いによる透過率の比較

が確認できた。

日野・山崎(1971)、池田ら(2000)が指摘したように、上記の波高低減は、鉛直板先端で剥離した渦運動によって波エネルギーが損失したものと考えられる。そこで、渦動粘性係数の空間分布を比較した(図-9)。ダブルバリア型は矩形型に比べ、2つの鉛直板先端で剥離した渦が浮体下面で干渉し、浮体幅スケールで広範囲に分布している。染料を流した可視化実験においても、染料が浮体前後の剥離渦に取り込まれ、干渉する様子が確認された。

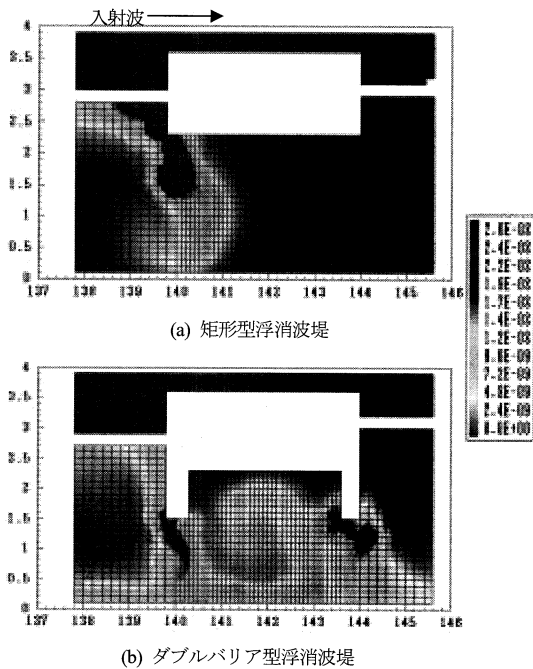


図-9 浮体形状の違いによる渦動粘性係数の空間分布

5. おわりに

本研究では、現地観測により、台風時の高波浪に対してもダブルバリア型浮消波堤は有効に機能し、対象とする周期帯の波に対して、波浪減衰効果を発揮できることを確認した。また、数値計算より、矩形型浮消波堤に比べ、ダブルバリア型浮消波堤では透過率を低減でき、さらにバリア長を調整することの有効性が確認された。この理由としては、ダブルバリア型浮消波堤では、2つの鉛直板先端で剥離した渦が浮体下面で干渉し、浮体幅スケールで広範囲に分布することで効率的に波浪エネルギー

を逸散できるためである。しかしながら、浮体が動揺する場合と固定の場合とでは、エネルギー損失のメカニズムが異なることも予想されるので、浮体周辺の流速構造については今後、画像解析を用い、詳細な検討が必要である。また、浮消波堤の平面的な配置方法や土砂制御機能等についても検討してゆく予定である。

参考文献

- 池田駿介・浅枝隆・野本健司・木村恵利子(2000): 波動場に置かれた垂直板付近の発生渦の特性とエネルギー逸散, 土木学会論文集, No.363/II-4, pp.87-96.
- 沿岸開発技術研究センター(2001): 数値波動水路の耐波設計への適用性に関する研究会報告書, 沿岸開発技術ライブラリーNo.12, p.296.
- 加藤雅也・津嶋了・濱中健一郎・大橋正臣・佐藤幸雄・佐伯浩(2001): マリーナにおける二重鉛直板付矩形浮体の港内波制御に関する研究, 海洋開発論文集, 第17巻, pp.211-216.
- 川崎浩司(1998): 潜水構造物による砕波変形と再生過程に関する基礎的研究, 名古屋大学大学院学位論文, 186p.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池治(1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技術研究所資料, No.248, pp.1-24.
- 中村孝幸・楨本太司・石本浩司・芝野真次(1983): 隅角部を有する浮体構造物まわりの渦形成と作用波力の算定法, 海岸工学論文集, 第30巻, pp.415-420.
- 中村孝幸・金度三・平岡順次・泉雄士・浅井威人(2003): 浮体式底層取水施設の波浪動揺の低減法に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.821-825.
- 中山哲蔵, 牧野弘幸, 荒井雅之, 大村智宏, 小林学, 田村仁, 灘岡和夫, 佐藤勝弘(2006): 港内埋没対策技術と地形変化予測モデルの開発, 海岸工学論文集, 53, pp.526-530.
- 日本港湾協会(2007): 港湾の施設の技術上の基準・同解説(下巻), p.585, 957.
- 日野幹雄・山崎丈夫(1971): 垂直板による波の反射率・透過率およびエネルギー損失, 土木学会論文集, 第190号, pp.75-80.
- 水谷法美・Rahman, A. M.・許東秀・島袋洋行(2004): VOF法による潜水浮体の波浪動揺と波変形に関する有限変位解析手法の開発, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.701-705.
- Christian, C. D. (2000): Floating breakwaters for small marina protection, Proc. 27th Coastal Engineering Conference, 3, pp.2268-2277.
- Koftis, T. H., P. Prinos, and E. Koutandos (2006): 2D-V hydrodynamics of wave-floating breakwater interaction, Journal of Hydraulic Research, 44, pp.451-469.
- Koutandos, E., P. Prinos, and X. Gironella (2005): Floating breakwaters under regular and irregular wave forcing: reflection and transmission characteristics, Journal of Hydraulic Research, 43, pp.174-188.
- Rahman, M. A., N. Mizutani, and K. Kawasaki (2006): Numerical modeling of dynamic responses and mooring forces of submerged floating breakwater, Coastal Engineering, 53, pp.799-815.