

ダブルバリア型浮消波堤における透過波に関する実験的研究

沖和哉*・江島隆晃**・田尻慶祐***・印牧史人****
山田文彦*****・由比政年*****・辻本剛三*****

* 京都大学先端技術グローバルリーダー養成ユニット

** 株式会社ジオ技術研究所

*** 日本マクドナルドホールディングス株式会社

**** 福井県土木部港湾空港課

***** 熊本大学大学院自然科学研究科

***** 金沢大学理工研究域環境デザイン学系

***** 神戸高専都市工学科

要 旨

矩形浮体の両面に鉛直板（バリア）を装着されたダブルバリア型浮消波堤は、防波堤で保護された漁港およびマリーナ等の小規模な閉鎖性水域への設置が有効である。しかし、現段階ではその明確な設計基準は存在しない。本研究は、ダブルバリア型浮消波堤の設計基準や透過率算定式構築に資するデータ収集を目的として、二次元水路および平面二次元水槽を用いた実験を行う。反射波および透過波を計測することによりエネルギー損失率を算定し、ダブルバリア型浮消波堤による波浪制御効果を評価する。

キーワード: ダブルバリア型浮消波堤, 二次元水路実験, 平面水槽実験, 港内静穏度

1. はじめに

近年、漁港やマリーナ等のように防波堤で防護された小規模な閉鎖性水域を維持管理する上で、いくつかの問題が生じている。まず、沖からの侵入波や航走波・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の低下が生じている。また、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。さらに、活発な沿岸・岸沖漂砂によって航路や港内が埋没し、港内環境維持のための浚渫等のランニングコストが増大している。これらの問題に対処するには、安価で施工性がよく、比較的小規模で水質環境を損なわない波浪制御方法が必要となるが、現状では個別に対策が行われている。例えば水質悪化の問題に対しては、潜堤等の海水交換が容易に行える没水型構造物の活用が見直されているが、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、建設コストが増大している。さらに、今後予想される地球温暖化に起因す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、砕波による消波機能の低下が懸念されるという新たな問題が生じている。

浮消波堤は、上記問題を解決するための構造物として、小規模な閉鎖性水域への設置に適している。まず、浮消波堤は構造物自体がコンパクトなため、海底面に設置する防波堤や没水型波浪制御構造物と比較して施工性・経済性において優位である。別の場所で作成した後に設置水域へ曳航することも可能なため、稼働している港であっても工事による影響を少なくすることができる。また、同様の特徴から季節的に設置あるいは撤去しての利用も可能である。次に、海底面と構造物の間の透水性により、水質悪化を防ぐことができ、環境保全の面でも優れている。さらに、地球温暖化によって今後予想される海面上昇が生じた場合、上述のように消波機能の低下が懸念される没水型構造物とは異なり、浮消波堤では流体内部の構造物隅角部で発生・剥離する渦運動に期待するため海面上昇後も一定の効果が期待できる。

以上のことから、ダブルバリア型浮消波堤は様々な利点があることがわかる。本研究では、ダブルバ

リア型浮消波堤の設計基準や透過率算定式構築のための基礎データ収集を目的として、二次元水路および平面二次元水槽を用いた実験を行う。反射波および透過波を計測することによりエネルギー損失率を算定し、ダブルバリア型浮消波堤による波浪制御効果を評価する。

2. 既往の研究

矩形断面を有する浮消波堤に関しては、これまでに様々な研究が行われ、多くの知見が得られている。また、浮消波堤に何らかの構造上の特徴を付加して波高減衰効果を高めたものも提案されている。しかし、反射率や波高低減率などの特性が十分明らかになっておらず、明確な設計基準も存在しない。Harms (1979) は古タイヤを有効活用した浮消波構造物を考案し、透過率について理論的および実験的考察を行った。水中にあるタイヤの移動に要するエネルギーフラックスを抗力と質量力で評価し、タイヤの径と波高の比が抗力係数と質量係数の比にほぼ等しいとして、深海域に設置された場合の透過率を算定している。Christian (2000) は矩形断面を有する浮体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減衰させ、透過率を低下させる方法を提案した。二次元水路を用いて検証を行った結果、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、透過率を低減可能であることを示した。Koutandos et al. (2005) は鉛直板の装着位置を浮体側面の入射側に変更してその効果について検討した。浮体の動揺の有無についても検討したところ、それらによる差はあまり顕著ではないとの結果を得ている。一方、加藤ら (2001) は矩形断面を有する浮体の岸沖両側面に鉛直板を装着したダブルバリア型浮消波堤について検討した。その結果、矩形浮体の場合と比べて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（ヒーピング）が著しく減少することを示した。以上はすべて断面二次元による検討である。これらにより基本的な特性は把握できるものの、実海域への適用となるとこれらの検討だけでは不十分である。

断面二次元的検討に対し、平面水槽を用いた平面的な検討例は散見される程度である。高木・明田 (1992) は実海域設置に向けての浮消波堤の配置計画について実験的検討を行った。平面実験において波高分布を計測しているが、浮体の幅14.5m（実スケール）に対して50m間隔での計測となっている。また、高木ら (1993) は平面水槽において複数設置された通水部を有する浮消波構造物による消波性能実験を

行ったが、波高分布の計測地点はいくつかの代表地点のみであり、有効消波領域を平面的に推定するには不十分である。中村ら (2002) は複数の浮体を群として配置した浮消波堤の波浪制御効果を検討するための平面水槽実験を行っている。Martinelli et al. (2008) は矩形断面を有する複数の浮消波堤を用いて、配置や波向きの変化による波高低減効果の違いについて検討した。外村ら (2008) は現地観測を行って、ダブルバリア型浮消波堤の波浪減衰メカニズムとその有効性の検証を行った。

3. 断面二次元水路実験

ダブルバリア型浮消波堤の基本的な特性を調べるために、断面二次元水路において実験を行う。

3.1 実験概要

使用した水路は、Fig. 1に示すように、神戸高専所有の長さ18m、幅0.6m、高さ0.8mの造波水路である。また、使用したアクリル製のダブルバリア型浮消波堤模型 (Fig. 2) の寸法は、岸沖方向幅0.25m、波峰方向長さ0.5m、高さ0.122m（内、バリア部0.05m）である。模型の縮尺は1/16を想定している。浮体模型はFig. 3に示すように水槽底面から鉛直に立てられた4本の鋼製円柱杭でローラー支持され、波の周期に同期して上下方向にのみベアリングによって滑らかに動く条件（以下では同位相の条件と呼ぶ）、および、Fig. 4に示すように塩化ビニル管を浮体模型の上面のアクリル板に4つあけた取り付け穴に通して浮体の動きに制限を持たせ、波の周期と同調せずに上下運動する条件（以下、位相差がある条件とよぶ）で、水深、入射波高および周期を変えてそれぞれ96

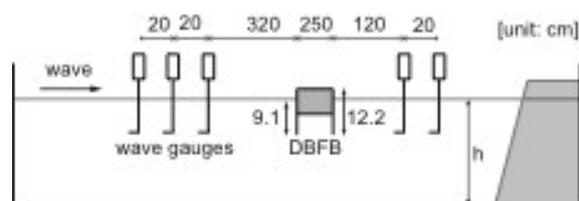


Fig. 1 Wave flume



Fig. 2 Double barrier floating breakwater



Fig. 3 Phase synchronized condition



Fig. 4 Phase lag condition

ケースの実験を行う。また、浮体模型を固定した実験とバリア無しの矩形型浮体の実験も行い、全部で198ケースの実験を行う。用いた水深、入射波高および周期をTable 1に示す。水深は、M.S.LおよびH.W.Lを考慮して設定する。なお、浮体の喫水は0.091mである。浮消波堤前面に3台、背後に2台の容量式波高計を設置し、入射波分離法を用いて反射波および透過波の波高を算定する。水路の岸側には砂層のスロープがあり、水路端部からの反射を抑えている。

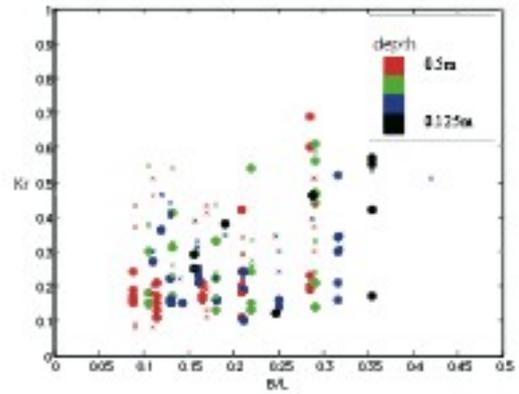
Table 1 Wave condition

h (m)	H (m)	T (sec)
0.187	0.031, 0.047, 0.063, 0.078, 0.094	0.75, 0.88, 1.0,
0.312		1.13, 1.25, 1.38,
0.500		1.5, 1.63, 1.75

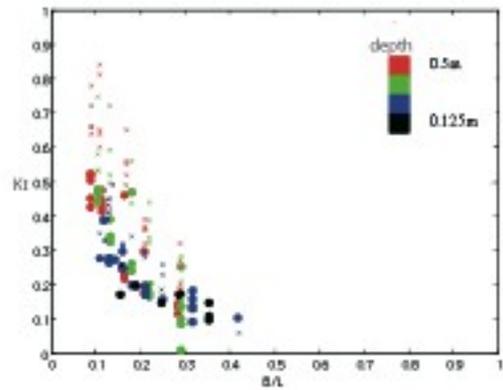
3.2 実験結果

浮消波堤の性能評価には反射率 K_r （入射波高と透過波高の比）、透過率 K_t （入射波高と透過波高の比）および次式で表されるエネルギー損失率 E_l を用いる。

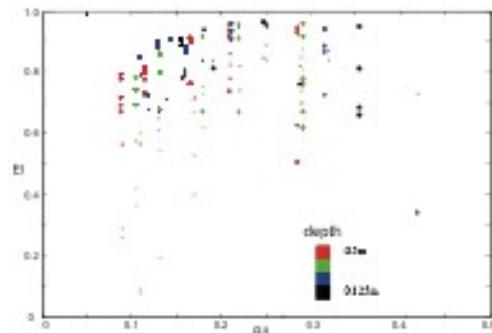
$$E_l = 1 - K_r^2 - K_t^2 \quad (1)$$



(a) Reflection coefficient



(b) Transmission coefficient



(c) Energy loss

Fig. 5 Experimental results

実験結果から透過率を定量的に評価するための無次元パラメータを考える上で、Christian (2000) およびKoutandos et al. (2005) の次元解析を参考にす。本研究では波力および浮体の回転等を考慮していないため、それらを除いたパラメータは次式の通りである。

$$K_t = f(B/L, H/L, d/h, h/H) \quad (2)$$

ここで、 B は浮消波堤の幅（岸沖方向）、 L は入射波長、 H は入射波高、 d は喫水、 h は浮消波堤設置水深で

Table 2 Characteristics of transmission rate

Case	h (m)	T (sec)	L (m)	H (m)	Heaving	K_t	Ratio of K_t	
A1	0.5	1.25	2.18	0.047	free	0.64	1.14	
A2					fixed	0.56		
B1				free	0.81	1.56		
B2	fixed		0.52					
C1	0.312		1.89	1.89	0.078	free	0.44	1.02
C2						fixed	0.43	

ある。

Fig. 5に、実験から得られた反射率、透過率およびエネルギー損失率を示す。横軸は上述の次元解析から得られたパラメータである浮体幅波長比 B/L である。図中の○および×はそれぞれ位相差がある条件および同位相の条件の結果を表す。まず、反射率の結果を見ると、浮体幅波長比との間に顕著な相関は見られないが、浮体の動きが波の周期と同位相の条件と比べて位相差がある場合の方が、全般的に反射率が小さくなる傾向がみられる。次に、透過率の結果をみると、浮体幅波長比が大きく、すなわち相対的に波長が短くなるにつれ、透過率が小さくなっている。これは、通常の消波構造物と同様の傾向である。浮体運動が波と同位相である条件と比較すると、位相差がある条件の方が、透過率は大幅に小さくなっている。特に、現地の周期で4.5～5.0秒程度の波に対しても透過率0.5をほぼ満足できる結果となった。エネルギー損失率の結果を見ると、反射率および透過率の結果から推測されるように、位相差がある条件の方が、同位相の場合より効率的にエネルギー損失が生じている。

Table 2に、浮体を固定した場合および動揺を許容する場合において、主に大きく条件の異なる3つのパターンの条件で透過率にどの程度の差が生じたかを比較した結果を実験条件とともに示す。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.の高波浪時の実験条件で、それぞれの条件においてケース名末尾の数字は1が浮体の動揺あり、2が浮体を固定した場合の結果を示す。表の一番右の列は、各ケースにおいて浮体の動揺がある場合と固定した場合の透過率の比を計算したものである。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、浮体を固定した場合と比較して、およそ1.0～1.6倍となっている。

4. 平面二次元水槽実験

実海域にダブルバリア型浮消波堤を設置すること

を想定すると、波向きや回折の影響を考慮する必要がある。そこで本研究では、北陸電力(株)所有の平面二次元水槽を用いて実験を行った。

4.1 実験概要

実験に用いたのは、北陸電力(株)所有の長さ28.5m、幅17m、高さ1.0mの平面二次元水槽である(Fig. 6)。水深を0.312mの一樣水深として、水槽のほぼ中央にダブルバリア型浮消波堤の模型を設置し、周期1.0secの規則波を、消波堤に対して直および斜め 25° の角度で入射させる。浮消波堤の模型寸法は、岸沖方向幅0.25m、波峰方向長さ2.0m、高さ0.122m(内、バリア部0.05m)である。直入射の場合、対応する B/L の値は、0.18となる。模型の固定方法は断面二次元水路実験における同位相の場合と同様に、鋼製杭によりローラー支持され、ベアリングによって上下方向にのみ滑らかに動く(Fig. 7)。また、喫水は0.091mである。平面水槽では位相差ありの条件での実験は行わない。水槽の岸側境界には礫で構成されたスロ

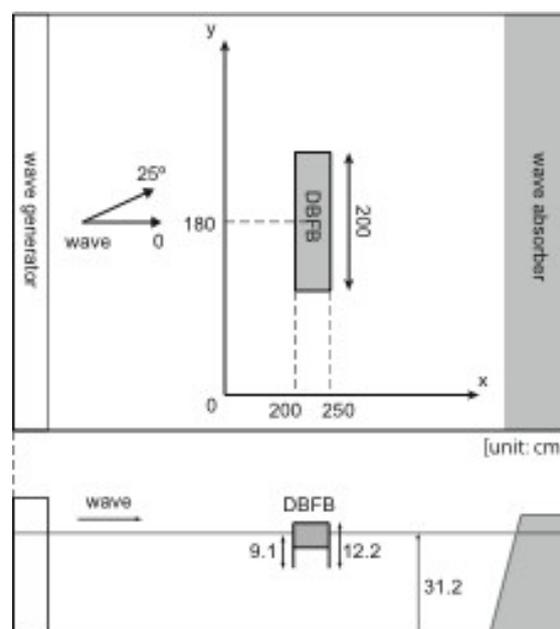


Fig. 6 Wave basin



Fig. 7 Double barrier floating breakwater

ープが、側方境界にはヘチマロンが設置してあり、水路壁からの反射の影響はないものとする。入射波が十分伝達した後、浮消波堤周辺の詳細な波高分布を調べるために、0.20m間隔で9台の容量式波高計を移動しながら、サンプリング間隔80Hzで計425点計測する。入射波の再現性の確認および入射分離のため、造波板からおよそ5mおよび6m程度離れた2地点に波高計を設置する。

Fig. 6に示すように、沖から岸向きにx軸を、造波装置と平行にy軸をとる。浮消波堤は前面が $x=2.0\text{m}$ に、中心が $y=1.8\text{m}$ となるよう設置する。平面二次元水槽を用いた実験では、造波板周辺を除き、波高形の記録から入射波を分離することが困難であるため、以下では入射波共存場における波高を入射波高で規格化した無次元波高を用いて検討する。

4.2 実験結果

Fig. 8に消波堤に波を直入射させた場合の波高分布を示す。図中の波高は、各地点で計測された波高を入射波高で基準化した値である。直入射の場合には、波の進行方向に対して浮消波堤を中心として対称な分布になると考えられるが、必ずしもそのような結果が得られていない。これは、模型の設置が入射波向きに対して厳密に直角ではなく、模型の動きが入射波に対して必ずしも一様ならなかったことも一因であると考えられる。浮消波堤の直背後中央において、最大30%の波高減衰が生じている。平面実験においては入射波分離を行うことができないため直接の比較はできないが、断面二次元水路実験における同条件の結果と比べると、平面二次元水槽の波高減衰効果が約10%~15%低下している。これは、主に回折波の影響によるものと考えられるが、この結果は高木ら (1993) の結果に一致する。

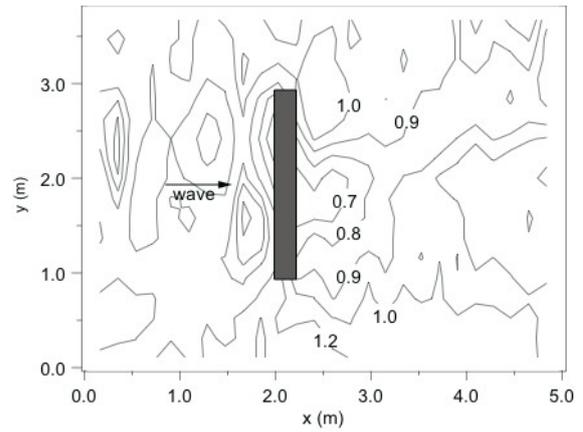


Fig. 8 Normalized wave height ($\theta = 0^\circ$)

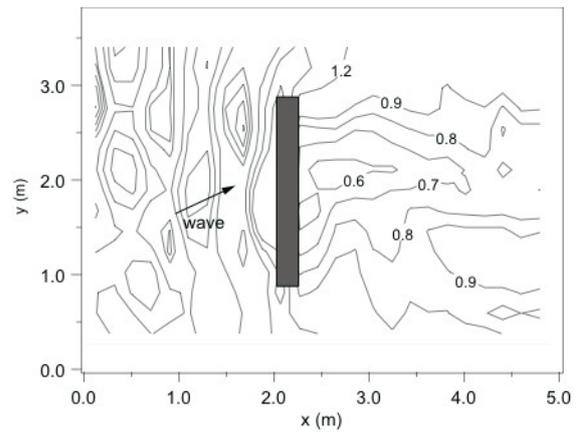


Fig. 9 Normalized wave height ($\theta = 25^\circ$)

Fig. 9に消波堤に対して 25° の角度で波を入射させた場合の波高分布を示す。入射波向きに応じた方向に、波高減衰領域が広がっている。浮消波堤背後中央付近において約40%の波高減衰が生じており、直入射の場合と比較して減衰効果が大きくなっている。また、波高減衰率が0.8以下である範囲を低減有効領域と仮定すると、y軸方向の有効領域は直入射で浮体幅の半分、斜め入射では浮体幅程度となっている。x軸方向の有効領域も、直入射で浮体幅の半分、斜め入射では浮体幅程度と、斜め入射の方が低減有効領域は広い。これは、斜め入射条件では入射波長に対して見かけの浮体幅が大きくなるためであると考えられる。なお、直入射および斜め入射ともに、計測された入射波高は同じであることを確認している。見かけの浮体幅以外の原因として、斜め入射の場合には浮消波堤が一様に上下動せず、両端部で位相差を持って動揺している影響も考えられるが、今回の実験からは明らかにはできなかった。

斜め入射の場合には減衰効果が向上するという今回の結果は、高木・明田 (1992) およびMartinelli et al. (2008) の結果に一致する。しかしながら、波高低減率が大きい場合には反射波が大きくなっているため、

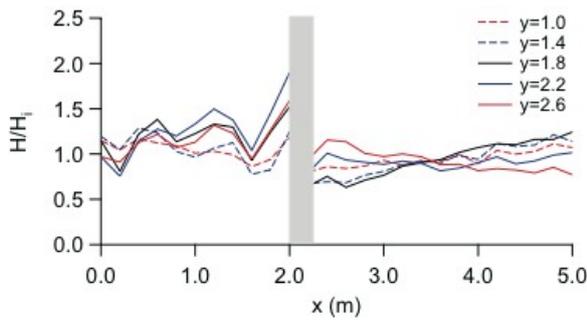


Fig. 10 Wave height at y-cross section ($\theta = 0^\circ$)

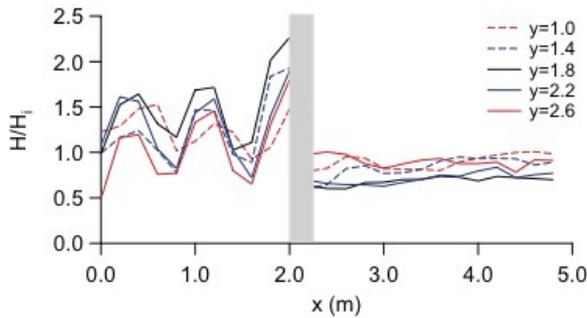


Fig. 11 Wave height at y-cross section ($\theta = 25^\circ$)

付近を走行する船舶への影響が懸念される。そのため、一概に斜めに浮体を配置するのが望ましいとは言えず、注意が必要である。

より詳しく比較するために、Fig. 10およびFig. 11に、x方向断面における波高分布を示す。それぞれの図において、黒色の実線は浮消波堤中央を通る断面の結果で、青色、赤色の順に中心から遠ざかる断面の結果となる。同じ色の実線と破線は、浮消波堤中心を通る線に対して対称の位置にある。Fig. 10は、直入射の場合の結果である。浮消波堤直背後においては、中央部が最も小さく、消波堤端部に近づくにつれ大きくなっていることがわかる。また、浮消波堤から波の進行方向に遠ざかるにつれ、回折効果によって波高が徐々に大きくなっている。Fig. 11は斜め入射の場合の結果である。直入射の場合と比較して、反射波が大きくなり、また、重複波のパターンも強く現れている。斜め入射の条件の方が透過率が小さい分、反射波が大きくなる様子が見てとれる。浮消波堤背後では、x方向に消波堤から遠ざかっても、波高はそれほど増加せず、直入射と比較して波高減衰領域が広い様子がわかる。

Fig. 12に、y方向断面における波高分布を示す。消波堤前面では反射波による重複波が生成されるが、位置によって大小が異なって比較しづらいため、消波堤背後断面のみを示す。青色の線が直入射の結果、赤色の線が斜め入射の結果をそれぞれ表す。実線、破線、点線の順に、消波堤から遠い位置の結果である。波高が最も小さくなる位置は、直入射の場合、

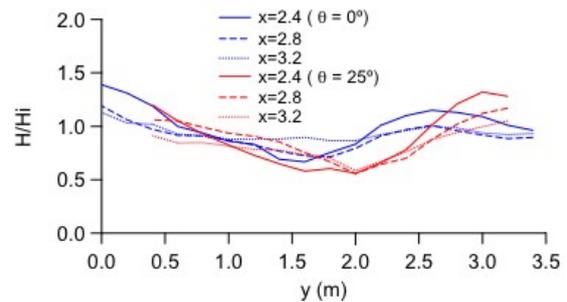


Fig. 12 Wave height at x-cross section

浮消波堤背後中央付近となっているが、斜め入射の場合は入射角に応じてずれている。波高の最小値は、斜め入射条件の方が小さくなっている。また、 $x=3.2\text{m}$ 断面においては、直入射条件では波高の低減効果が見られないのに対し、斜め入射条件ではまだ波高減衰領域となっていることがわかる。

5. おわりに

本研究では、ダブルバリア型浮消波堤による波浪制御効果を評価するために、二次元水路および平面水槽を用いて実験を行った。得られた主要な結果は以下の通りである。

- [1] 二次元水路実験によって得られた結果は、次元解析によって、透過率についてはパラメータ B/L (B : 浮体幅, L : 入射波長) によって傾向をまとめることができたが、反射率についてはばらつきが大きかった。
- [2] 浮体の動揺について、水位と同期して動く場合と位相差を持って動く場合では、位相差がある条件の方が波高低減効果が大きかった。
- [3] 斜め入射の場合には、入射波長に対して浮防波堤の幅が大きくなるため、波高低減率が向上した。しかし、反射率が大きくなるため、実際の設計においては注意が必要である。
- [4] 平面二次元の場合、回折波等の影響により、断面2次元での結果と比較して、約15%波高低減効果が減少した。
- [5] 直入射の場合に比べて斜め入射の場合の方が、波高低減有効領域が広がった。

今後はこれらの実験結果をもとに、ダブルバリア型浮消波堤における透過率算定式および数値波浪予測モデルを構築したい。

謝 辞

本研究の一部は財団法人レントオール奨学財団の研究助成を受けて行った。また、実験を行うにあたり、熊本大学技術職員の外村隆臣氏、金沢大学大学

院生の四辻拓哉君，NTCコンサルタンツ（株）の津嶋了氏，安瀬地一作氏にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 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浪制御に関する研究, 海洋開発論文集, 第17巻, pp.211-216.
- 高木儀昌・明田定満 (1992): 福井県高浜地区養殖場造成に係わる水理模型実験-浮消波堤の配置計画と安全性について-, 水工研技報, 水産土木14, pp.37-75.
- 高木儀昌・森口朗彦・明田定満・滑川順 (1993): 浮消波堤の3次元水槽における消波性能について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.651-655.
- 中村孝幸・水谷法美・許東秀・金度三 (2002): 浮防波堤の配置方法と波浪制御効果に関する研究, 海洋開発論文集, 第18巻, pp.299-304.
- 外村隆臣・江島隆晃・今村格・津嶋了・辻本剛三・由比政年・沖和哉・山田文彦 (2008): 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, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.896-990.
- Christian, C. D. (2000): Floating breakwaters for small marina protection, Proc. 27th Int. Conf. on Coastal Engineering, vol.3, pp.2268-2277.
- Harms, W. V. (1979): Design criteria for floating tire breakwater, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, Vol.105, pp.149-170.
- Koutandos, E., P. Prinos and X. Gironella (2005): Floating breakwaters under regular and irregular wave forcing: reflection and transmission characters, Journal of Hydraulic Research, Vol.43, pp.174-188.
- Martinelli L., Ruol P. and Zanuttigh B. (2008): Wave basin experiments on floating breakwaters with different layouts, Applied Ocean Research, Vol.30, pp.199-207.

Experimental Studies on Transmitted Waves behind the Double Barrier Floating Breakwater

Kazuya OKI *, Takaaki EJIMA **, Keisuke TAJIRI ***, Fumihito KANEMAKI ****,
Fumihiko YAMADA *****, Masatoshi YUHI ***** and Gozo TUJIMOTO *****

* Education Unit for Global Leaders in Advanced Engineering/Pharmaceutical Sciences, Kyoto University

** Geo Technical Laboratory Co., Ltd

*** McDonald's Holdings Japan

**** Department of Public Works, Fukui Prefectural Government

***** Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University

***** School of Environmental Design, Kanazawa University

***** Department of Civil Engineering, Kobe City College of Technology

Synopsis

The floating breakwaters are suitable for the man-made semi-closed water regions such as the fishing ports and marinas because of their abilities of water exchange and easy-construction. Furthermore, the attachment of double barriers promotes the eddy diffusion and reduces the transmitted wave height. In this study, experimental study was conducted on wave flume and wave basin in order to examine the wave reflection and energy dissipation characteristic of the Double Barrier Floating Breakwater (DBFB).

Keywords: Double barrier floating breakwater, experimental study, wave transmission, wave diffraction, harbor tranquility