# ダブルバリア型浮消波堤の透過率算定と平面波浪場への適用

# A study on an estimation of horizontal wave fields around double barrier floating breakwater

辻本剛三<sup>1</sup>・沖 和哉<sup>2</sup>・山田文彦<sup>3</sup>・柿木哲哉<sup>4</sup>・由比政年<sup>5</sup> 江島隆晃<sup>6</sup>・今村 格<sup>7</sup>・津島 了<sup>8</sup>

# Gozo TSUJIMOTO, Kazuya OKI, Fumihiko YAMADA, Tetsuya KAKINOKI Masatoshi YUHI, Takaaki EJIMA, Itaru IMAMURA and Satoru TSUSHIMA

Flow field around the Double Barrier Floating Breakwater (DBFB) has been measured using PIV technique. Averaged flow directions were onshore side for the fixed DBFB and offshore side for the heave motion DBFB. A simple experimental formula based on Harms's idea for determining transmission coefficient as a function of Reynolds number and wave condition was proposed. The proposed simple formula and an extended energy balance equation considering diffraction effect were applied to estimate wave height distribution behind DBFB. The present model predicts the wave height distribution behind DBFB with a good accuracy.

# 1. はじめに

従来の浮防波堤の設置目的は浮体の動揺を積極的に利 用した波浪制御であり,消波構造物の大半はカテナリー 係留方式による.浮揚式海上立地として利用する大型浮 体構造物においては,浮体動揺を小さくすることを目的 とし,相反する機能を同時に満足させるために杭係留に よる浮体が提案されている.

金ら(1993)は杭係留の浮体に本研究と同様なバリア (論文ではスカートと称している)やスリット,孔を取 り付けた形状を提案し,波高や浮体動揺を低減させるた めの形状や係留方法を検討している.しかし,係留力等 に着目しており,透過率等の理論的な扱いは行われてい ない.Koutandosら(2005)は矩形断面の浮体形状を4タ イプ作成し,エネルギー損失の観点から波制御効率を実 験的に調べ,固定浮体の前面に鉛直板を取り付けると良 いことを示している.透過率の観点からは固定と動揺に 差は見られないが,前者は反射率,後者はエネルギー損 失率が増大しており,透過率低減に寄与する機構が異な っていることを示した.Koftisら(2006)は固定の矩形 断面浮体に鉛直板の有無と喫水深を変化させた数値計算 により,乱流諸量の変化を調べている.

このような関連から外村ら(2008,以後前報)はダブ

1 フェロー 2 正会員	工博 博(工)	神戸市立高専都市工学科教授 京都大学先端技術グローバルリーダー養 成ユニット講師
<ol> <li>3 正会員</li> <li>4 正会員</li> <li>5 正会員</li> <li>6 正会員</li> <li>7</li> <li>8</li> </ol>	博(工) 博(工) 博(工) 修(工)	熊本大学大学院自然科学研究科教授 神戸市立高専都市工学科准教授 金沢大学理工研究域環境デザイン系教授 株式会社ジオ技術研究所 西田鉄工(株)マリーナ事業部部長 日技クラウン(株)海洋開発部部長

ルバリア型の浮消波堤(以後、DBFB)の高波浪制御特 性について現地観測を行い,対象とする周期帯の波に対 して波浪滅衰効果が発揮できることを確認した.また, CADMAS – SURF(沿岸開発技術研究センター,2001) を用い,バリア長を調整することで透過率の低減が可能 になることを示している.しかしながら,反射率や透過 率などの浮消波堤の特性が十分に明らかにされておら ず,浮消波堤の運動形態によってエネルギー損失の機構 が異なることが予想され,浮消波堤周辺の流動構造を把 握する必要がある.また,前報では断面2次元の扱いが 主であったために,実務的には平面波浪場への適用を検 討する必要がある.そこで,本研究では浮消波堤の消波 機構を明確にして透過率算定式を提案し,それに基づい て浮消波堤背後の静穏度特性を評価することを目的と する.

## 2. 断面2次元水槽実験

#### (1) 実験概要

実験装置等は前報と同様であり模型を造波板より6.5m の位置に設置し、可視化実験と画像解析 (PIV)を行っ た.可視化には2mm厚のレーザーシート (ダブルパルス 間隔2000ms)を水槽側面からガラス越しに入射し,水槽 底面に設置した鏡で鉛直方向に直角に曲げ,鉛直2次元 の可視化断面を作成した.画像撮影には画素数 1008x1018ピクセルのCCDカメラを使用し,サンプリン グ間隔は15Hzとした.撮影のタイミングは浮体と造波板 の間で生じる波の多重反射の影響を避けるために,浮体 に3波入射した直後から約5秒間とした.造波板から浮 体沖側5m,6m,浮体岸側7m,8mの地点に波高計を設 置した.実験条件は波の周期1.25s,水深50cmの一定値

ケース	波高 (cm)	浮体動摇	バリア
1		可動	有
2	4.7		無
3	4.7	固定	有
4			無
5	7.8	可動	有
6			無
7		固定	有
8			無

表-1 可視化実験条件



として、①バリア(浮体底部の鉛直板)の有無②浮体の 動揺の有無③波高の高低(7.8cm, 4.7cm)を変化させて、 計8ケースの実験を行った.その条件を表-1に示す.以 後,浮体がheavingする場合を可動,運動がない場合を固 定と称する.

#### (2) 実験結果

図-1にケース1の浮体沖側前面でzero-downの位相にお ける, 渦度と流速ベクトルの画像解析結果を示す. 流速 ベクトルと渦度は1/15秒毎の値を3波分平均したもので ある. 図中の線で四角は浮体である. 渦度の値は時計回 りが負で,反時計回りが正である.

岸側(浮体内部)の下方に向かう流れが形成され,波 の峰通過位相付近で形成された反時計回りの渦がバリア 背後に残っている.同位相のケース2~4と比較するとケ ース2では明確な渦の形成はなく,岸側に向かう流れも きわめて小さい.ケース3ではケース2に類似している が,渦の形成領域が狭い.ケース4はケース2に類似し ている(図略).浮体が可動すると波の谷通過時には, バリアの先端がより下方となるために,渦の形成が促進 され,形成領域も大きくなる.

図-2,図-3にケース1とケース3の定常成分の結果を示 す.ケース1には浮体の最高点と最下点の位置を描画し ている.バリアを付けることで渦対が同様に形成され, その値もほぼ同程度であるが,沖側の渦の形成位置が両 者で異なるために,渦対により誘起される流れの向きが



可動では岸向き,固定では沖向きと方向が全く異なって いる.固定の沖向きに向かう流れは,後述するように反 射波の影響によるものと考えられる.

 $K_r: 反射率, K_t: 透過率, KI: (1 - K_r^2 - K_t^2)^{0.5}$ で定義 されるエネルギー損失率とB/L(B:浮体幅, L:波長)の 関係を図-4に示す.可動と固定では透過率には差は見ら れないが,前者はエネルギー損失率,後者は反射率が大 きくなり,Koutandosら(2005)と同様な結果である.

一方,Jungら(2005)は固定と可動(rollingのみ)の 矩形浮体周辺の流動をPIVで実験的に調べており,可動 の場合は固定の場合の半分程度の乱れ強度しかなく,浮 体と水粒子との速度差が小さいことがその要因であるこ とを示している.Koutandosら(2005)は入射波が短周 期になると,浮体前面の重複波の周期と浮体の運動周期 に差が生じ,より効率的にエネルギー損失が生じること



を示している.可動の形態によってエネルギー損失率が 異なるが、本研究の浮体の係留法では水平方向の浮体の 動きが制御されており、より効果的にエネルギー損失が 生じている.

#### 3. 平面波浪場実験

#### (1) 実験概要

現地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検討する必要がある.そ のために北陸電力(株)所有の長さ28.5m,幅17m,高 さ1.0mの平面水槽を用いて静穏度実験を行った.模型の 形状や設置方法は前報と同じであるが,沿岸方向長さを 2.0mとした.20cm間隔で9台の波高計を移動させながら, サンプリング間隔80Hzで計425点計測した.入射波は波 高4.0cm,周期1.0s,水深31.2cmとし規則波を用いた. 波向きは浮消波堤に入射角0°と25°の2ケースとした. なお,平面水槽実験では造波板周辺を除き,水面波形の 記録から入反射分離をすることが困難であるため,以後, 入反射波共存場の波高を入射波高で無次元化した無次元 波高で検討する.なお、浮体は可動の場合のみとした.

#### (2) 実験結果

図-5に入射角0°の場合の無次元波高の分布を示す.本 来なら浮消波堤の中心線に対して左右対称になるが、そ のような結果にはなっていない.断面2次元実験の場合 と比較して,浮消波堤の動き(heaving現象)が入射波に 対して,必ずしも均一に生じていなかったことが一因と 考えられる.消波堤背後では30%程度の波高減衰が生じ ている.

図-6に入射角25°の場合の無次元波高の分布を示す. 波高比が0.6以下の領域も形成され,波高比が0.7以下の 範囲は図-5の直入射に比べて3倍程度ある.

目視観測によれば斜め入射の場合,浮消波堤にrolling 現象が発生し,結果的にheavingが抑えられ浮消波堤とし ての動きが低下し,そのために浮消波堤前面に反射波が 発生し易くなり,見掛け上の波高減衰効果が向上した. Martinelli (2008) らも入射角の増加と共に透過率が線形



に減少することを示しており,本実験と同様な結果となっている.なお,断面実験に見られた渦の形成は実験で は確認できなかった.

# 4. 透過率と抗力係数の検討

#### (1) Harms (1979) の方法による透過率の算定

矩形浮体による透過率の算定は例えば伊藤(1972)に よる理論的な検討があるが、本研究のようなダブルバリ ア型浮消波堤の透過率算定に関する研究は存在しない. Harms(1979)はタイヤを連ねた浮消波堤を提案し、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、透過率を算定している.本研究ではHarms の考えを援用するが、浮消波堤は比較的水深が浅い水域 に設置されることもあり、全水域への適用を考慮した.

波動場や振動流場に置かれた物体に対する抗力係数に 関する研究は多数見られる.例えば、浦島ら(1992)は スリット壁の抗力係数と質量係数の関係を平均水平流速 とスリット幅で定義したレイノルズ数で整理しており、 レイノルズ数が数千程度の時,抗力係数が10程度,質量 係数が1程度であることを示し、本研究でも抗力が卓越 するとして,透過率を式(1)で与えた.

$$K_t = \frac{H_t}{H} = \exp\left(-\frac{4\pi}{3}\frac{C_D}{P}\frac{H}{L}\frac{B}{L}\frac{1}{n}\right)\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

ここで,  $K_t$ :透過率,  $H_t$ :透過波高, H:入射波高,  $C_D$ :抗力係数, P:単位断面当たりの構造物が占める割 合, B:消波堤の岸沖方向長さ, L:入射波長, n:群速 度と波速の比である. Harmsは式(1)の誘導において抗 力係数と質量係数の比が入射波高とタイヤ径の比と同程 度であるとし,適用水域を深海域に限定しているため, 式(1)の "4"を "10", n=0.5とした場合に相当する. ここではP=1と一定で扱い,抗力係数( $=C_D/P$ )を陽な 形で与えることで透過率を算定した.

#### (2) 抗力係数の評価

前報の断面2次元実験で計測した透過率に式(1)を適





用して抗力係数を算定した.抗力係数はKC数やレイノ ルズ数によって変化することが知られており、本研究で は微小振幅波理論の水平最大流速と浮消波堤の喫水深を 用いてレイノルズ数を定義した.図-7に抗力係数とレイ ノルズ数の関係を示す.レイノルズ数の増加に伴い,抗 力係数が減少する通常の傾向と同様である.

図-7の抗力係数の妥当性を評価するには,直接波力等 を計測することが必要であるが,現時点では計測装置等 が不充分であるために,数値計算による検討を行った. 辻本ら(2000)はk- ε 乱流モデルと境界適合座標系 (BFC)を用いて有孔水平板周辺の流動や乱れの検討を行 っている.本研究でも同じ基礎式と計算手法を用いた.

画像解析により浮消波堤は波とほぼ同位相で上下運動 していることを確認したので,水面からの浮消波堤の喫 水深を常に一定とし,その場所で辻本ら(2000)と同様 な境界条件を設定して,浮消波堤の運動を考慮した.本 計算の座標系は一価関数で表現されており,浮消波堤上 面が完全に露出すると計算が不可能になるために,計算 では浮消波堤上面は水面と一致させて扱った.

図-8は図-1の条件下での流速ベクトルと乱れエネルギー (間隔0.005 (m/s)<sup>2</sup>)の計算結果で,沖側バリア付近でゼロ アップとなる位相である.尚,横軸は図-1に一致させて いる.浮消波堤下方に向かう流れが見られ,流速値も画 像解析とほぼ同程度である.沖側バリア先端には乱れが 集中しており,この乱れが消波に寄与していると推定さ れる.一方,岸側バリア先端には明瞭な乱れは発生して いない.この計算結果をもとにAl-Kazilyの手法で算出し た抗力係数の位相変化を図-9に示す.抗力は波の峰通過 時に最大となるために,その位相時に着目した.図中の 圧力差は沖側と岸側のバリア全面に作用する圧力を積分 した値である.本計算条件のレイノルズ数はおよそ10000 程度であり,図-7から算定される抗力係数と図-9の値は同 程度の20前後である.

# 5. 平面波浪場への適用

#### (1) 計算方法

本研究では実務的な適用を想定しているために,計算 負荷の大きい数値モデルは適切でない.平面波浪場の検



討を行う場合, 浮消波堤を通過する波の影響だけでなく, 回折の影響を取り込むことが重要である.沖ら (2000) の計算方法はエネルギー平衡方程式に回折効果を考慮で き,構造物の透過率を陽に与えることで構造物背後の静 穏度を評価可能になっている.本研究では入射波の条件 より式 (1) で算定される透過率を浮消波堤背後の計算 格子に与えた.このモデルは反射波も計算できるが,浮 消波堤背後の静穏度を評価するために,透過波高のみを 示す.

#### (2) 計算結果

図-10は直入射の無次元波高の計算結果である.実験 結果と比較してやや無次元波高が小さくなっている.高 木ら(1993)は平面実験と断面実験の結果を比較して, 前者の消波性能が10~15%後者に比べて低下する(無次 元波高の増加)ことを指摘している.透過率は断面実験 より算定された値を用いており,両者の消波性能につい





て高木らの値を考慮すると、概ね無次元波高が最大15% 程度大きくなり、実験結果との差異も小さくなる.

図-11は浮消波堤に対して25°の角度で波が斜め入射した場合の結果である.斜め入射の場合式(1)のBに,仮 想堤体幅(回折計算での仮想開口幅に相当)を与えている.計算結果は実験と比較してやや小さくなっている.

前述の実験の目視観測より斜め入射の場合,浮消波堤 の挙動は直入射の場合と異なっている.この事は間接的 に浮消波堤の透過率の評価に影響を及ぼしている.透過 率は波浪条件から算定されるが斜め入射の影響が考慮さ れていない.そこで,斜め入射の成分を浮消波堤に対し て法線方向と接線方向に分け、法線方向の流動が寄与す ると考え,水平最大流速の余弦成分を用いたレイノルズ 数で透過率を算定した.実験と計算の差を明確にするた め,両者の波高差を実験波高で無次元化した相対誤差 を%表示で図-12に示す.誤差で見ると両者の差異は1% 前後であり、計算と実験の対応は良好である.

## 6. 結論

本研究で得られた知見は以下の通りである.

- (1) 浮消波堤の運動形態が波浪減衰に寄与する機構は異なる.固定は反射波,可動はエネルギー減衰が卓越する.
- (2) 波浪条件と浮消波堤の形状から決定されるレイノル ズ数を用いた浮消波堤の透過率算定式を提案した.
- (3)回折効果を考慮できるエネルギー方程式に、提案した透過率算定式を組み込んで平面波浪場の算定を行った結果、実験結果との対応も良好であった.又、斜入射の影響を考慮する方法を提案した.

今後の課題としては, 浮消波堤に作用する圧力の計測 を通じて抗力係数の算定が必要である.

謝辞:本研究の一部は科学研究補助金基盤研究(c)(代表:辻本剛三,課題番号21560547)により行われた.実



験を行うにあたり北陸電力(株),熊本大学技術職員の 外村隆臣氏,学部学生(当時)の田尻慶祐君,金沢大学 学部生(当時)の四辻拓哉君,大学院生の印牧史人君, 日技クラウン(株)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る.

#### 参考文献

- 伊藤善行(1972):海洋構造物の諸問題,水工学に関する夏 期講習会,土木学会水工学委員会,B-8,1-20.
- 浦島三郎・近藤俶郎(1992):振動流実験におけるスリット 壁のCD及びCMの推定と消波設計への応用,海岸工学 論文集,第39巻, pp. 731-735.
- 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 ブライリーNo,12, p. 731-735.
- 沖 和哉・問瀬 肇(2004):位相平均型波浪予測モデルの 高精度化に関する研究,海岸工学論文集,第51巻,pp.1-5.
- 金 憲泰・椹木 亨・青木伸一(1993):杭係留浮体による 波浪制御に関する実験的研究,海岸工学論文集,第40巻, pp. 901-905.
- 高木儀昌ら (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.
- 辻本剛三・角野昇八・竹原幸生・山野貴司・重松孝昌 (2000) : 画像計測及び乱流モデルによる有孔水平板の波 浪制御特性と周辺流動場の解明,海岸工学論文集,第47 巻,pp.781-785.
- 外村隆臣・江島隆晃・今村 格・津島 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 体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.896-900.
- Jung, K. H., K. A. Chang and E. T. Huang(2005): Two-dimensional flow characteristics of wave interactions with a free-rolling rectangular structure, Ocean Engineering, Vol. 32, pp.1-20.
- Harms Volker W. (1979): Design criteria for floating tire breakwaters, ASCE, WW2, pp.149-170.
- Koftis, T.H. P. Prinos and E. Koutandos (2006):2D-V hydrodynamics of wave-floating breakwater interaction, J. Hydraulic Research, Vol. 44, No. 4, pp. 451-469.
- Koutandos. E. ら (2005): Floating breakwaters under regular and irregular wave forcing: reflection and transmission characteristics, J. Hydraulic Research, Vol. 43, No. 2, pp. 174-188.
- Martinelli L., Roul P. and Zanuttigh B. (2008): Wave basin experiments on floating breakwaters with different layouts, Applied Ocean Research, Vol.30, pp. 199-207.