

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

辻 本 剛 三* ・ 角 野 昇 八** ・ 竹 原 幸 生***
山 野 貴 司**** ・ 重 松 孝 昌*****

1. はじめに

海岸構造物が本来要求されている機能は、防災上の観点からの波浪、流れ、漂砂の制御であり、そのような観点からの構造物は多数存在する。また、景観や水質に配慮した構造物として、人工リーフや潜堤などが近年盛んに用いられている。しかしながらこれらの構造物で波浪制御等を行なうためには、天端幅を対象とする海域に生じる波の波長の数倍程度にする必要がある。その結果、捨石等のマウンドが海底面を広く覆い、周辺水域の生物生態の生活空間を消失させる懸念がある。特に人工リーフ等が建設される海域は有光水深も浅く、植生性プランクトンを始めとする食物連鎖の基点ともなる水域であり、多様な生物の生存環境となっているために、できる限り底質に変化を与えないことが大切である。

角野ら (1993), Kakuno ら (1998) はこのような観点から図-1 に示すような没水タイプの有孔部を有する構造物を提案し、その水理特性を実験的・理論的に検討している。その水理学的特性を簡単に述べると、波動エネルギーの減衰に着目すれば、有孔部の開口率として 10% 程度が最適であることを示している。特に天端水深がゼロ (つまり天端と静水面が同じ) の時は波高伝達率がゼロとなり、反射率もきわめて小さいために波動エネルギー損失率も約 90% になり、波浪制御の効果がきわめて高くなる。さらに平均水位上昇量も堤体の沖側から徐々に増加し岸側端で最大となるが、その値は在来的人工リーフと比較しても小さくなる。

また、漸近展開接合的手法を用いて有孔部におけるエネルギー損失を考慮した理論展開を行ない、波の反射率、透過率、エネルギー損失率の実験率との比較を行なっている。その際の剝離渦によるエネルギー率の算定には、従来の柱体列や直立消波工に用いられているエネルギー損失係数 1.5 の値を適用することにより、理論計算と実

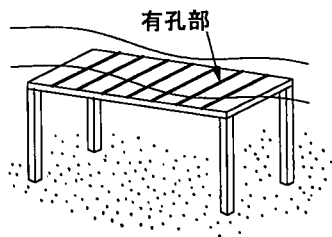


図-1 有孔水平板

験結果の良好な一致を得ている。

彼らの提案している構造物の特徴は、没水性、有孔部付きの水平板の存在、及び水平板の下部に水空間が確保されている点である。この構造形式に類似した構造物を扱った研究例として、服部 (1975) は単一または複数の不透過あるいは多孔の水平板を用いた防波堤を提案し、その波高伝達率を検討している。消波効果は、水平板の設置水深が増大するに連れて低下し、複数水平板では単一水平板より消波効果は増加するものの、消波効果の大部分は静水面付近の水平板の影響が大きいことを示している。実験を通して理論的な扱いには多孔部でのエネルギー消散機構の解明が必要であることを述べている。青山ら (1988) は非定常緩勾配方程式に基づく方法により傾斜を含めた水平板上の波の変形 (透過、反射、減衰) を扱っている。しかしながら、平板上周辺の渦の生成に関する再現性が充分でないためにエネルギー逸散の寄与が波の変形に考慮されていない。高橋ら (1989) も青山らと同様な手法で静水面上に突出した傾斜板を対象とし、越波を考慮した波の変形を検討している。反射率はほぼ実験と計算では一致するものの、透過率に関しては充分な一致が得られていない。これは碎波による波浪エネルギーの損失が考慮されていないためであり、その必要性を述べている。小嶋ら (1989) は没水水平板上の波の分裂に着目して波浪制御を検討している。ポテンシャル接続法による理論的扱いであるために、水平板周辺で生じる渦や水の粘性効果によるエネルギー損失が考慮されていないため、理論値が計算値に比べて過大な値となっている。余ら (1991) は波の非線形性を考慮したモデルで没水水平板周辺の波動場の非線形解析を行なっている。

* 正 会 員 工 博 神戸市立工業高等専門学校助教 都市工学科

** 正 会 員 工 博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

*** 正 会 員 博(工) 近畿大学講師 理工学部土木工学科

**** 学生会員 神戸市立工業高等専門学校都市工学科専攻科

***** 正 会 員 博(工) 大阪市立大学講師 工学部環境都市工学科

また、この水平板に作用する波力の算定を有限要素法による線形解析により、波浪条件や平板の設置条件の違いによる波力係数の変動を調べている。村上ら (1992) は波動場において傾斜没水平板を用いて周辺水域の流動及び波浪の計測を行っており、消波に及ぼす板長、没水深、傾斜角度の影響を実験的に調べている。加藤ら (1993) はテキスタイル型の消波構造物の波浪制御特性について、シートの運動機構を取り込んだ解析を行なっている。その結果、剝離等によるエネルギー損失、いわゆる乱れの効果を取り込んだ解析を行っていないため、実験結果と解析結果には差が見られ、その必要性を述べている。

このように角野らが提案した構造物形状に類似した構造物に関する研究例はいくつか行なわれているもの、波浪制御に着目したものが多く、流動場に関しては村上らによる実験のみである。また、理論的扱いにおいても、ポテンシャル理論に基づいているためにその適用には限界があり、乱れや渦の影響を取り込む必要性をいずれも述べている。このような複雑な形状の構造物が提案される背景には、周辺の海岸環境を考慮した構造物が必要とされていることによる。そのためには、物理特性として流動場の把握がきわめて重要である。角野らの理論的扱いでは波浪制御に関しては、十分な結果が得られているが流動場に関する情報は得られない。

そこで、本研究では、有孔 (スリット) 水平板 (以後、水平板) 周辺の流動や乱れ特性、水平板の消波機構を画像計測、数値計算に基づく手法により明かにし、さらにこの構造物の砂移動制御機能を 2 次元海浜実験により確認することを目的とする。

2. 数値計算上の水平板の扱い

水平板により誘起される流動、乱れや渦度の特性を把握するために辻本 (1997, 1998)、Tsujiimoto ら (1999) による数値計算手法を用いた。詳細はこれらを参照されたい。ここでは、有孔部を有する水平板の数値計算上での扱いを述べる。

水平板の位置は物理座標系では、常に底面から一定の場所に固定されているが、基礎方程式群は境界適合座標系を用いて変換しているために、位相毎 (つまり、水面形状毎) に計算座標系ではその設置位置が変化する。そのために計算過程においてその位置を更新させる必要がある。計算座標系上での水平板の位置が得られたら、開口率が 0% 場合はそれらの格子点での鉛直流速をゼロとし、10% の場合は格子点の 10ヶ所中 9ヶ所の鉛直流速をゼロとした。その他の物理量に関しては特別な扱いはしていない。厳密に言えば、水平板の上下面での境界層の発達に伴う影響を考慮する必要がある。例えば、壁面と同様な no slip 条件や壁関数の適用などがある。さらに水

平板の厚みを考慮することも可能であるが、ここでは、これらに関しては考慮していない。実験等より有孔部からの鉛直流れによる乱れの生成が著しく、これらの影響の方が著しいと推察されたので、水平板上のせん断力は小さいものとして扱った。なお、水面形状によっては水平板の位置が上下するが、その精度は鉛直格子間隔 1 つ分程度である。

3. 実験方法

実験は長さ 18 m、幅 0.6 m、高さ 0.8 m の 2 次元造波水路で行なった。長さ 0.96 m、幅 0.6 m、厚み 1.2 cm の板に幅 1.2 cm のスリットを 6 cm 間隔で波の進行方向と直角に開け、この板を上方より吊り下げて水路に設置した。流速計測方法は、画像計測法の 1 つである PIV (Particle Imaging Velocimetry) を用いた。照明には、ダブルパルス Nd:YAG レーザー (New Wave 社製) を使い、シリンダリカルレンズによりシート光とした。2 本のレーザーのパルス間隔は 5 ms で、繰り返し周波数は 15 Hz で計測を行った。照明光は、水槽底部に設けられた反射鏡を通して、水槽底部より波進行方向と平行に照射された。有孔水平板のレーザーシート光が通過する部分は透明アクリル部材を使い、水平板の上下約 20 cm を計測した。ただし、鉛直方向に水平板の厚み (1.2 cm) の数倍は、光源の関係上影となるために粒子追跡はできない。

PIV アルゴリズムとしては、竹原ら (2000) による Super-Resolution KC 法を用いた。この方法は、2 時刻間の画像中での各粒子の移動を計測することができ原理的に PTV (Particle Tracking Velocimetry) であるため PIV の中で最も高い空間解像度を持つものである。

画像は 1008×1018 (pixel) の CCD ビデオカメラ (Kodak 社製) により撮影された。ダブルパルスレーザーと CCD ビデオカメラはコントローラーに制御され、同期がとられている。トレーサー粒子として、粒径 50 μm 、比重 1.02 のナイロン粒子を用いた。表-1 に画像計測の実験条件を示す。

海浜変形実験は中央粒径 0.523 mm の砂粒子で 1/20、1/10 勾配斜面の移動床を作成し、碎波点近傍に水平板を設置後、堆積・侵食性の波浪を数時間作用させ、海浜地

表-1 実験条件

ケース	波高 (cm)	周期 (秒)	水深 (cm)
1	7.8	1.0	37
2	6.6	1.22	37
3	5.0	1.47	37
4	3.8	1.84	37

形を砂面測定器で計測した。

4. 実験結果

4.1 流速分布について

画像計測により得られた流速値は、現段階ではデータの位相平均ができるシステムになっていないため、瞬間値であることに注意する必要がある。

図-2 は水平板の沖側端より 35 cm の地点で得られた流速ベクトルである。図中の破線で囲まれた領域が水平板である。この流動場の主な特徴は、有孔部からの鉛直流に伴う渦の形成である。上向きの鉛直流は水面が静水面を横切る前の位相から発生し始め、位相の経過に伴いその値が増加し、時計回りおよび反時計回りの渦を水平板の上層に形成する。渦の形成領域は時計回りの渦の方がややその値が大きい。この位相では波の峰がまだ中央の有孔部上を通過する前のため、隣接した渦は渦対をなして自由水面に極めて接近する。

水面に接近した渦対は水面を盛り上げるような変動を与えながら、水面を境界とする鏡像による渦対の影響で左右に移動し、両隣の渦対の片方と新たに渦対を形成し、下向きに移動する。この渦対は水平板に到達する前に速い水平流れによって岸側に移動する。この時、水平流速は波状底面上を沿って流動するような形態を示す。

一方、図-3 は図-2 と同じ場所で 0.33 秒後の結果である。水平板の下層では波の峰の通過後、有孔部から鉛直下向きの流れが発達し、流軸をやや右下方に向けた噴流が生じ、それに伴う時計方向、及び反時計方向の渦対が形成される。この位相では、上層部は岸向きの水平流が発達しているにも関わらず、下層は渦対の存在する水域外では、流れはほとんど見られない。しかしながら、下層の渦対は相互作用により下方に移動し、それに伴う沖向きの流れ場が形成される。

図-4 に図-2 と同じ実験条件で、計測場所が水平板の

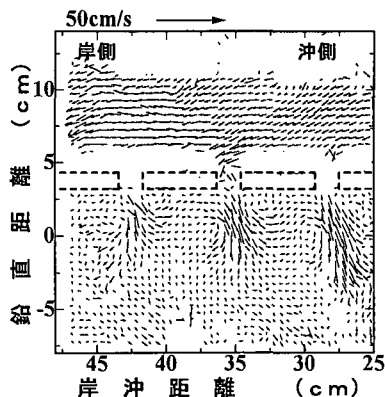


図-3 流速ベクトル (沖側端から 35 cm)

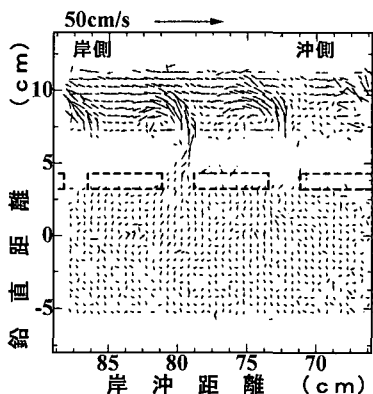


図-4 流速ベクトル (沖側端から 80 cm)

沖側端から 80 cm における結果を示す。この測定点では波はすでに減衰している地点である。図-2 と同様に上層では渦対が形成されるが、反時計回りの渦が顕著であり、そのために、水面近傍では岸向き流速が速くなり、水平板近傍は極めて遅いことがわかる。また、水平板の下層部は時計、反時計方向の渦が形成される。図-3 のものと比較してその渦度の値がやや弱いので消滅が早い(図略)。

図-3 の渦度の分布を図-5 に示す。渦度は空間平均された流速値で計算した。図-3 において剥離渦が形成された有孔部周辺に高い渦度を示す所が見られる。有孔部からの鉛直上向きの流速が発達する位相では、図-5 の場合とは逆向きの渦が形成される(図略)。一周期間を通じて有孔部からの鉛直流れが上向きの時は、沖側に時計回り、岸側に反時計回りの渦が形成される。一方、鉛直流れが下向きの時は、沖側に反時計回り、岸側に時計回りの渦がそれぞれ形成されることが明かとなった。

4.2 消波の機構

本水平板による波の消波機構としては、有孔部からの鉛直上下流の影響が著しいと考えられる。鉛直流を活用

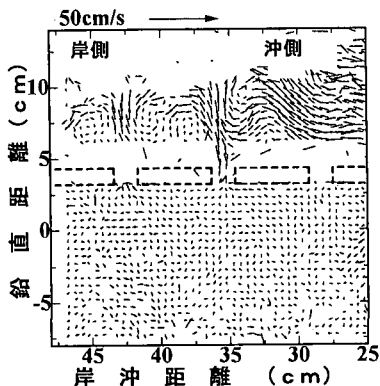
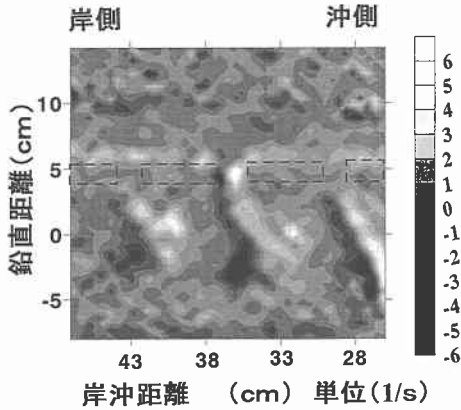


図-2 流速ベクトル (沖側端から 35 cm)



図—5 渦度の分布 (図—3 に対応)

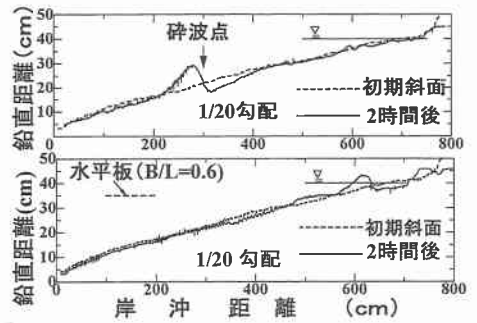
した波の制御としては室田ら (1968) の Water Curtain さらには、中村ら (1971) や岩垣ら (1975) のエアーカーテン (空気防波堤) がある。これらの研究の結果から消波の主たる要因としては①波の遮断効果 (慣性力) ②水平流による砕波③乱れであるといわれている。

これらの要因を本水平板に考慮して波の消波機構を検討すると、実験によれば反射率は有孔部の有無やその開口率に関係なくほぼ一定の値となっているために①の直接の効果は小さい。②は波の進行方向と逆方向の水平流との相互作用によって発生する砕波である。しかしながら、画像計測によると本水平板上の流速は、波の進行方向に卓越した流れであり、砕波も発生し難くなっているために②の影響も考え難い。

角野ら (1993) は乱れを直接評価をしていないが、解析的に有孔部からの流れの剝離にともなうエネルギー損失量を算定し、その結果を用いて透過率の見積もりを行っている。一方、本実験の画像計測から直接乱れ成分を抽出していないが、図—5 の渦度分布からも明らかに、有孔部からの剝離流に伴う渦度を有する流れ場が形成されており、これらは水平板の上下層に常に見られる。このことは、渦の形成に波動エネルギーが消費されるという、日野ら (1971) や池田ら (1985) の垂直板上の波高減衰機構と基本的には同じである。しかしながら、垂直板と異なる点は、半周期毎に時計、反時計回りの渦が水平板の上下に同時に形成されており、さらに有孔部の数に比例して渦の数が増える点である。また、鉛直流と波の進行方向との相互作用による乱れの発生の影響がある。これらによって効率的に消波が生じていると考えられる。

4.3 地形変化

図—6 は斜面勾配 1/20 上に周期 1.0 秒、波高 15 cm の侵食性の波浪を 2 時間作用させた結果である。水平板を設置しない時は砕波点近傍にバーが形成される典型的な



図—6 水平板の有無による地形変化

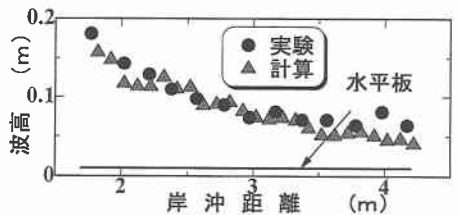
侵食地形である。一方、水平板を砕波点付近に設置すると、顕著なバーは形成されず、岸側付近に砂が堆積し汀線の前進が見られる。

5. 計算結果

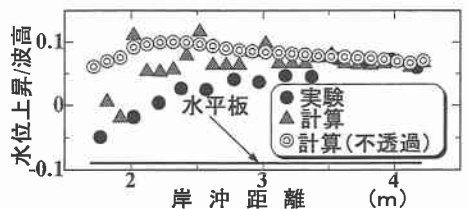
5.1 波高分布と水位上昇

図—7, 8 に本計算手法の妥当性を検討するために、入射波高 10.5 cm, 周期 2.0 秒, 水深 35 cm, 天端上水深 5 cm の条件における水平板上の波高分布, 入射波高で無次元化された水位上昇量の比較を行なった。図—7 は波高の分布である。本水平板上では、強制的な砕波は発生しないが、前述の消波機構により波高が減衰する。その値は、水平板の沖側から岸側にかけて徐々に減少し、その値も実験値と同程度である。

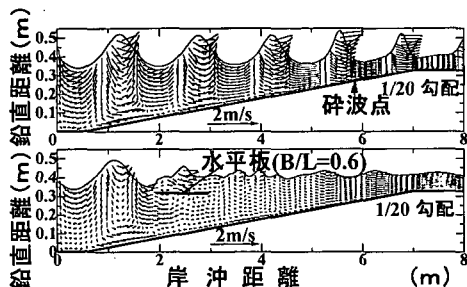
図—8 に平均水位上昇の比較を示す。実験では沖側から徐々に増加し急激な変化は生じない。またその値は著しくない。計算による結果も同様な傾向及び値を示して



図—7 水平板上の波高の比較



図—8 水平板上の水位上昇の比較



図—9 流速分布と水面形状の比較

おり両者の対応も良好である。所々、計算値が大きくなっているが、それらは平板上の有孔部の場所に対応している。比較のために開口率ゼロの場合の計算結果を記述している。開口率ゼロの平板上では、強制的な砕波によって波高が減衰するため、水位上昇の傾向が異なることがわかる。

5.2 水面形状と流速分布

図—9 は図—6 の実験条件で計算した結果である。図示していないが、平板周辺には著しい乱れが生じているために水平板を通過後の波は著しく減衰し、周辺の流速も遅くなり、水平板の影響が顕著であることがわかる。

6. ま と め

水平板の有孔部からの剥離に伴う渦により波浪エネルギーが効率的に減少し、その結果波浪減衰や海浜地形の侵食に対して効果的であることが明らかとなった。また、乱流モデルを適用した数値計算と波高変化や水位上昇などの実験結果の対応も良好であることがわかった。

謝辞：なお、本研究は文部省科学研究費基盤研究(A)「沿岸域砕波面での大気—海洋気体輸送機構の解明とそのモデル化に関する研究」(研究代表者：角野昇八)の補助を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

青山哲也・泉宮尊司・磯部雅彦・渡辺 晃 (1988): 没水平板に

よる波浪制御法に関する基礎研究, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 507-511.

池田駿介・浅枝 隆・野本健司・木村恵理子 (1985): 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, 第 363 号/II-4, pp. 87-96.

岩垣雄一・安井誠人 (1975): 空気防波堤に関する研究 (第 1 報) —空気防波堤の基本的性質—, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 563-569.

角野昇八・鐘一 明 (1993): 透過性没水水平板の波浪制御特性に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 666-670.

加藤雅也・浜中健一郎・佐藤幸雄 (1993): テキスタイル消波構造物の波浪制御特性の解析と実験, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 636-640.

小島治幸・井島武士 (1989): 没水水平板による波の分裂と波浪制御に関する研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 531-535.

高橋陽一・盛高裕生・磯部雅彦・渡辺晃 (1989): 傾斜板を用いた波浪制御構造物に関する研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 519-523.

竹原幸生・R. J. Adrian・江藤剛治 (2000): KC 法を用いた新しい Super-Resolution PIV の提案, 水工学論文集, 第 44 巻, pp. 431-436.

辻本剛三 (1997): 乱流モデルによる砕波点近傍の流れ場の数値計算, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 101-105.

辻本剛三 (1998): 浮遊砂濃度フラックスによる 2 次元海浜の地形変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 496-500.

中村 充 (1971): エアカーテンによる上昇流の発生に関する研究, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 280-285.

服部昌太郎 (1975): 水平板式透過性防波堤の波高伝達, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 513-517, 1975.

日野幹雄・山崎丈夫 (1971): 波による鉛直板よりの渦の形成とエネルギー逸散, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 61-65.

村上仁士・細井由彦・澤村賀行・池田良一 (1992): 波動場における鉛直および水平没水水平板周辺の流れ特性, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 571-575.

室田 明・村岡浩爾・中山茂雄 (1968): Water Curtain による波浪の減衰に関する実験的研究—鉛直上向き噴流列の応用研究—, 第 15 回海岸工学講演会論文集, pp. 334-339.

余 錫平・磯部雅彦・渡辺 晃 (1991): 没水平板に作用する波力に関する研究, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 671-675.

Kakuno, S.・M. Endo・Y. Zhong・T. Shigematsu and K. Oda (1998): Development of a new type of reef breakwater, Theoretical and experimental study, Proc. of 26th ICCE, pp. 2216-2178.

Tsujimoto, G.・S. Kakuno・T. Shigematsu・K. Kurata・M. Endo and T. Hosoyamada (1999): Numerical simulation of turbulent flow over a new type of reef breakwater with perforations by the $k-\epsilon$ turbulence model, Coastal Structure'99, pp. 705-712.