

透過性構造物周辺の流れ場の特性に関する研究

STUDY ON WAVE-INDUCED FLOWS INSIDE AND OUTSIDE OF PERMEABLE STRUCTURE

水谷法美¹・許東秀²・平野善弘³・清水秀行³・GOLSHANI, Aliasghar²
Norimi MIZUTANI, Dong-Soo HUR, Yoshihiro HIRANO, Hideyuki SHIMIZU
and Aliasghar GOLSHANI

¹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)

²学生会員 工修 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻(同上)

³学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻(同上)

This study is to investigate, experimentally and numerically, wave-induced flow inside and around a porous structure. Laboratory experiments were conducted to visualize the wave-induced flow field. Numerical simulations were also performed for quantitative investigation of the flow and its governing quantities. The calculated wave height distribution is confirmed in good agreement with experimental result. Flow passing through the permeable structure is also confirmed in both experiments and computations. Moreover, it is found that the flow near the corner can play an important role on overall flow field inside and around the structure.

Key Words : permeable structure, wave-induced flow, pore flows, Lagrangian velocity, VOF model

1. 緒言

従来型防波堤に水質改善機能を付加することを目的として、さまざまな海水交換機能を有する防波堤の開発が研究されている。これまでは、内湾域の富栄養化した水を希釈することを目的として港外側から港内側への効率的な定常流を生起させることが研究の中心となってきた。一方、構造物に透水性を持たせ、その透水域に礫を充填し、礫表面に付着する生物作用により水質そのものの改善を行うことも有効な水質改善手法であると考えられ¹⁾³⁾、波浪制御機能にそのような水質浄化機能という付加機能を有する複合機能型波浪制御構造物の開発は工学上重要であると考えられる。

礫間浄化機能を有する透過性構造物の浄化効率は、構造物内部における水粒子の滞留時間や構造物内部への流入量などにより影響される⁴⁾⁷⁾。したがって、構造物内部の水粒子の挙動を把握することが基本的に重要であるが、透水性構造物内部の水粒子の挙動は、防波堤の開口部からの流れなどにも影響されるため、構造物外部の海水流動も含めて議論しておく必要がある。

本研究では、平面波浪水槽内に有限な大きさの透

水性構造物模型を設置し、構造物周辺の流れ場をオイラー的・ラグランジュ的に計測するとともに、数値計算も行つて透水性構造物内外の流れ場について考究する。

2. 水理実験

実験を、図-1に示す名古屋大学大学院工学研究科土木工学教室の平面波動水槽(長さ28m, 有効幅8m, 深さ0.8m)を使用して行った。この水槽の一端にはピストン型造波装置が設置されており、他端には反射波を極力少なくするため、勾配1/10の消波斜面が設置されている。この水槽内に、造波板から10mの位置に透水性構造物をその法線が波進行方向と一致するように設置した。透水性構造物は、アングル鋼材と金網で作成した透水性の金属フレームに、直径30mmのガラス球を充填して作成されたもので、その堤長 l を3m, 堤高を0.5m, 堤幅を0.5mとした。なお、ガラス球による透水層 λ の間隙率は約35%である。

本研究では、波浪場の基礎的な要因の変化にともなう流れ場の変化特性を把握するため、入射波を規

則波に限定した。そして、その周期Tを1.0s, 1.4sの2種類変化させ、それぞれの周期に対して入射波高H_iを3.0cm, 5.0cm, 7.0cmの3種類変化させた。そして、構造物周辺で水位変動と流速、およびフロートの挙動の計測を行った。いずれの計測も現象の対称性を利用し、構造物の中心線を基準に半断面のみを対象とした。水位変動とラグランジュ流速の計測を図-1に示す計測点で行った。計測した水位変動は、ペン書きレコーダーに記録するとともに、時間間隔20ms, データ数6000個でAD変換し、パソコンにも収録した。なお、水位変動の計測は水位計3台を1組とし、場所を変えながら繰り返し行ったが、この際、一回の計測が終了するとともに造波を中止して水位計の移動を行った。そして、場が静水状態となっていることを目視で確認し、次の計測を行った。なお、すべての計測を静水状態から開始した。

また、造波装置から3.9mと4.35mの位置に別途2台の水位計を固定し、これらの出力も同時に記録した。そして、各計測における水位変動の位相合わせ、および入射波高の計測に使用した。

ラグランジュ流速は、フロートを用いた可視化実験により行った。フロートは、図-2に示すような、直径4mmの円筒状のフローター、プラスチックシートを十文字に組み合わせた流水板（40mm×20mm）、およびビデオ撮影時の目印とするための直径30mmのプラスチックシート製着色円盤から構成される。異なる水深の流れ場の計測を行うため、流水板の位置を上端部の円盤から5cm, 10cm, 15cm, 20cmの4種類変化させ、それぞれの形状のフロートを約70個づつ作成した。これらのフロートのうち、同一の形状のもの63個を、図-1に示す3m×4mの範囲に0.5m間隔の格子点上に、造波を開始した後、波が定常に至ったと判断された後に同時に投入した。そして、このフロートの移動の様子を8mmビデオカメラで

上方から撮影した。

撮影したビデオの画像を、パソコンに収録し、画像処理ソフトから座標値として読みとることで、フロートの挙動を解析した。なお、フロートの追跡による平均流速は、本来、波一周期ごとの移動距離から定義すべきと考えられるが、波一周期間におけるフロートの位置の変化が微小であったため、読み取り誤差を小さくすることを優先させ、波4周期間の位置の変化から平均流速を求めた。

また、構造物近辺におけるオイラー流速を電磁流速計を使って計測した。計測は、静水面下10cmの位置のx方向流速uとy方向流速vを対象とし、構造物周辺の8点で行った。

3. 数値解析

透水性構造物内外における水粒子の挙動とそれに対する構造物や波浪の条件の影響を定量的に考究するため、川崎⁸⁾による3次元VOF法に榊山⁹⁾によるポラスボディモデルを組み合わせた3次元の完全非線形波浪モデルに基づく数値解析モデルの開発を行って、数値計算を行った。基礎式は、式(1)の連続式と式(2)の運動方程式、およびVOF関数Fの移流方程式である。

$$\frac{\partial(\rho\gamma_v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \gamma_i)}{\partial x_i} = q(y, z, t)\delta(x - x_s) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho\gamma_v u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j \gamma_j)}{\partial x_j} = -\gamma_v \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho\gamma_v g_i - \rho M_i - \rho R_i + \frac{\partial(\gamma_j \tau_{ij})}{\partial x_j} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\gamma_v F)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x F u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_y F v)}{\partial y} + \frac{\partial(\gamma_z F w)}{\partial z} = Fq \quad (3)$$

ここにx_i：座標でi=1,2,3に対しそれぞれx,y,zが対応する。u_i：流速のi成分、ρ：流体の密度、q：ソースの強さ、γ_i：i方向の面積空隙

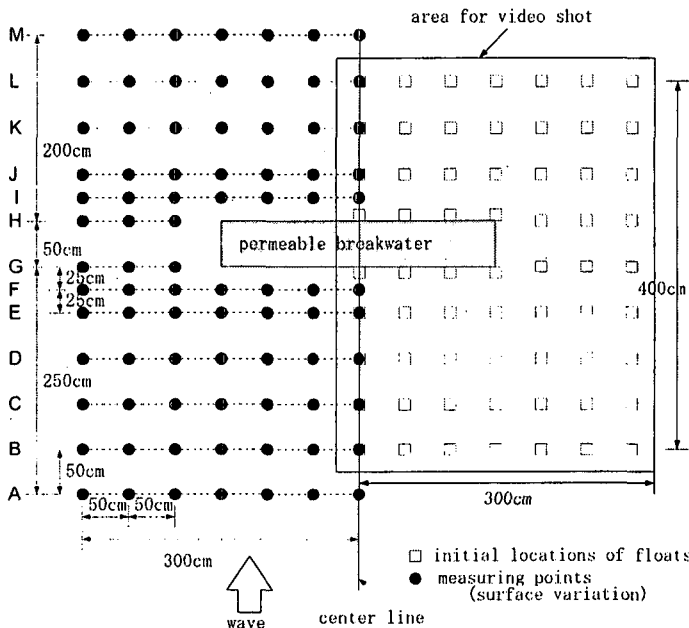


図-1 ビデオ撮影領域と水位変動計測点

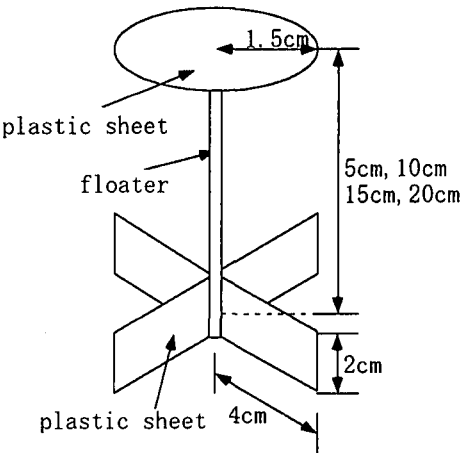


図-2 フロートの概略図

率, γ_v : 体積空隙率, δ : ディラックのデルタ関数, x_s : ソースの位置, p : 圧力, g_i : $i=3$ のとき重力加速度 g , それ以外は0である. また, τ_{ij} は体積要素 ΔV の表面に作用する応力テンソルである. さらに, R_i と M_i はそれぞれ流体抵抗のうちの抗力項 (等価分布抵抗としてモデル化する) と固体から受ける質量力の i 方向成分を表す.

式(1)~(3)を与えられた境界条件の下で解くことにより, 波動場の解が求められることになる. 実際には以上の式をNASA-VOF法のスキームに従って差分法によって解いた.

4. 波高分布

構造物周辺の無次元波高 H/H_1 の分布の実験結果を図-3に例示する. なお, 構造物の中央を原点, 入射波の進行方向を x 軸の正の向きとし, 沿岸方向の構造物中央から端へ向かう方向 (x 軸から半時計回りに 90° の方向) を y 軸の正の向きとした.

図より, 構造物前面に波高の特に高くなる部分と低くなる部分が交互に現れており, 構造物の側方では1.0前後の値で波向き方向に分布している. 構造

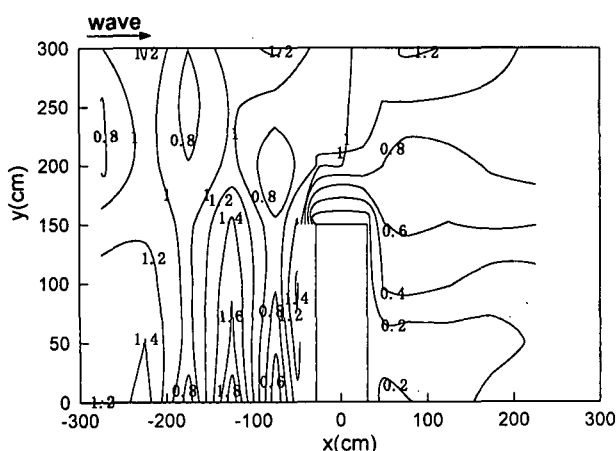


図-3 無次元波高の空間分布
(実験値, $T=1.4s$, $H_1=5.0cm$)

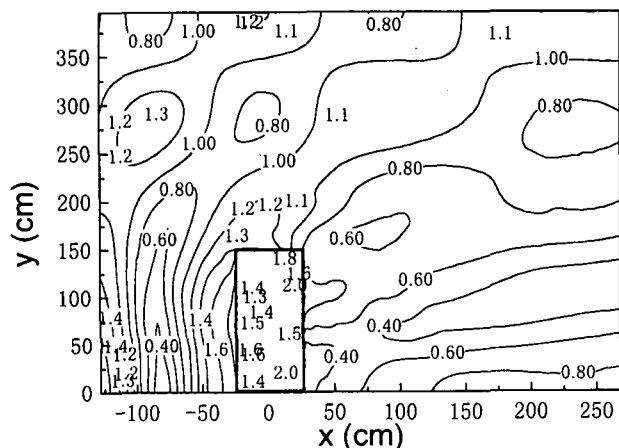


図-4 無次元波高の空間分布
(計算値 $T=1.4s$, $H_1=5.0cm$)

物前面では, 構造物からの反射波と入射波の干渉により部分重複波の場が形成されているのに対し, 構造物側方では入射波がそのまま透過することにより, このような無次元波高分布となる.

一方, 構造物背後では波高の小さい静穏域が広がっているが, 構造物から離れるにしたがって徐々に波高が大きくなる. 構造物背後は, 構造物を通過する波動成分が極めて小さいために静穏になっているが, 構造物の側方を通過した波が回折してくることにより, 構造物から離れたところで波高が大きくなっていると考えられる.

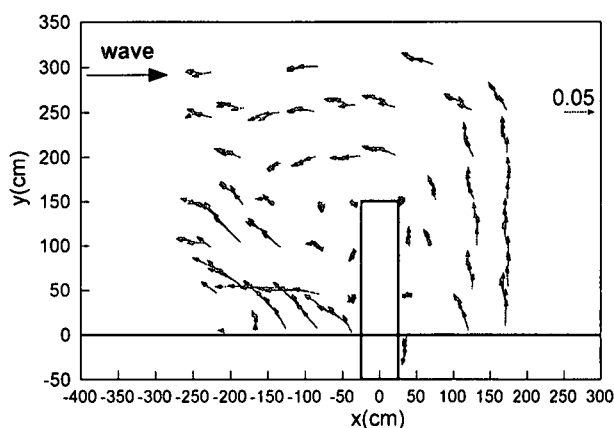
図-4は, 図-3と同一の波条件に対する無次元波高の計算値を示したものである. 若干ではあるが, 全般に実験結果の無次元化波高よりも数値計算結果の方が小さな値となっているなど, 両者の間に多少の差異が認められるが, 数値解析結果に認められる最も波高が高くなっている構造物直前面は, 実験では計測装置の制約のために水位の計測ができなかった範囲であり, そのために図上に値が示されておらず, 計算結果との差異が見られるが, 実験最中の目視観察によれば, 構造物直前面では波高が大きくなっていること確認している. したがって, このことを考慮すれば, 数値解析の結果は実験結果を妥当に再現していると判断できよう.

5. 流れ場の特性

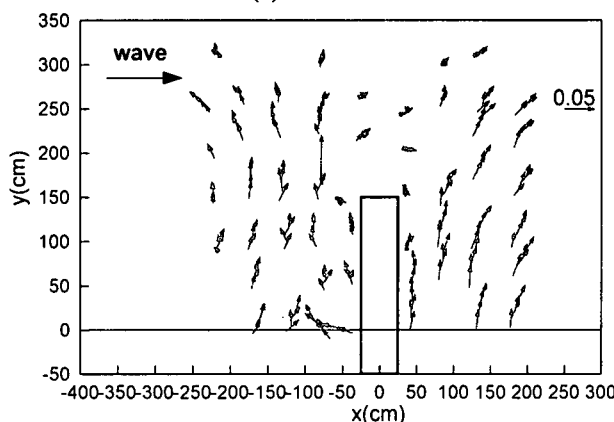
フロート追跡から求めた無次元平均流ベクトル $\bar{v}/\sqrt{gH_1}$ ($\bar{v}$: 平均流ベクトル) の空間分布を図-5に例示する. フロートの数が有限で, 個々の間隔が密でないため, あまり明瞭ではないものの, 全般的には, 構造物前面で構造物中央から外側へ向かうとともに, 岸沖方向に対しては沖側に戻るような, 反時計回りの循環流の一部を形成するような流れが認められる.

一方, 構造物背後では, 沿岸方向 (y 方向) については構造物前面と同様, 構造物中央から外側へ向かう流れが形成される. これらの流れは同時に岸向きの成分も持っており, 構造物背後では時計回りの循環流の一部を形成しているように見える. 村上ら¹⁰⁾ は, 斜面上に設置された潜水浮体まわりの流れ場の計測実験から, 浮体背後で循環流の形成を確認している. 構造物の形状や底面の形状は異なるものの, 本研究の平均流場はその循環流とよく似ているといえる.

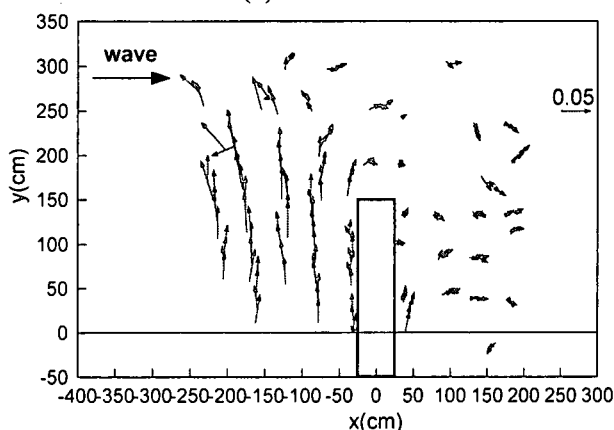
紙面の都合上水深方向に異なる3点のみを示しているが, フロートの流水板を5cmずつ変化させた場合, 構造物前面と背後の水域では, 水深が変化しても平均流の分布は定性的には似ていると考えられるものの, 構造物側方では, 上層部で沖向きの流れが卓越し, 逆に下層部では岸向きの流れが生じることが判明した. すなわち, 流れ場の三次元性がここから確認できる. このことは, これまで主に使用され



(a) $z=-5\text{cm}$



(b) $z=-10\text{cm}$



(c) $z=-20\text{cm}$

図-5 平均流ベクトルの空間分布
($H_I=3\text{cm}$, $T=1.4\text{s}$)

てきた鉛直積分量を使った平面二次元の解析手法には適用の限界があることを同時に示唆する。

なお、ここで述べた結果は、入射波の周期や波高が変化しても認められた一般的な傾向であることを付記しておく。

図-6に、 $T=1.4\text{s}$, $H_I=5\text{cm}$ の場合の $z=-5\text{cm}$ における平均流の空間分布を示す。図-5(a)の $H_I=3\text{cm}$ の場合と比較すると、波高の大きい方が平均流の流速は大きくなっていることがわかる。しかし、図示していないが、 $H_I=7\text{cm}$ の場合、平均流が逆に小さくなった場合も認められている。これは、非線形抵抗により透水性構造物内で消費されるエネルギーも波高が大

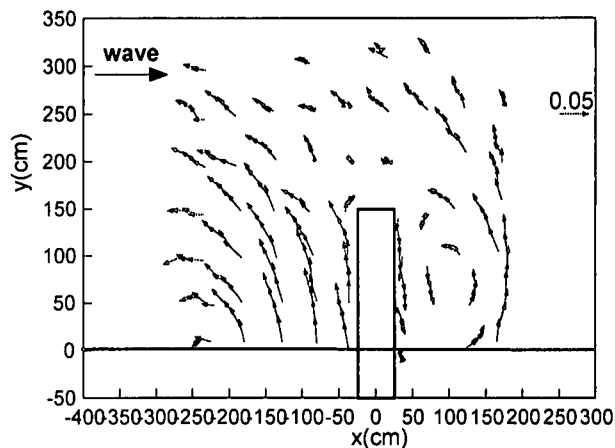


図-6 平均流ベクトルの空間分布
($H_I=5\text{cm}$, $T=1.4\text{s}$, $z=-5\text{cm}$)

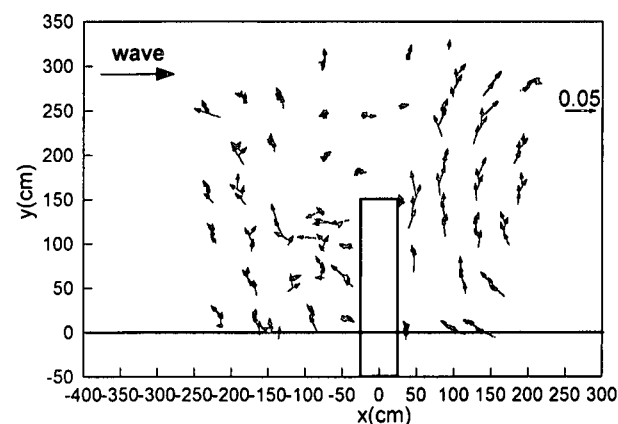


図-7 平均流ベクトルの空間分布
($H_I=3\text{cm}$, $T=1.0\text{s}$, $z=-20\text{cm}$)

きくなると大きくなるため、波の非線形性の影響による効果がエネルギー消費によって打ち消されたことが一原因として考えられるが、この点については、今後さらなる検討が必要である。

図-7は、 $T=1.0\text{s}$ と周期の異なる場合の平均流の結果を例示したものである。構造物背後では $T=1.4\text{s}$ の場合とかなり似たような平均流場が形成されるのに対し、構造物前面では、平均流の向きの変化が大きくなる傾向がある。これは、部分重複波の腹と節の間隔が狭くなると同時に、 y 方向の波高の変化も $T=1.0\text{s}$ の方が大きく、構造物前面における物理量の変化の空間勾配が大きくなっていることが一因であると考えられる。

電磁流速計により測定されたオイラー流速の結果を図-8に例示する。なお、実際にはオイラー流速の計測はフロートによるラグランジュ流速の計測とは反対側の断面で行ったが、以下では比較のために左右を反転させて図示している。電磁流速計の計測は、すべて $z=-10\text{cm}$ で行っているが、フロートを使った実験結果の解析からは、この水深は開口部の流れの向きが逆転する位置となっていた。オイラー流速の計測実験の結果では、入射波の周期と波高に関わらず、すべての場合で開口部での流速は沖向きとなっ

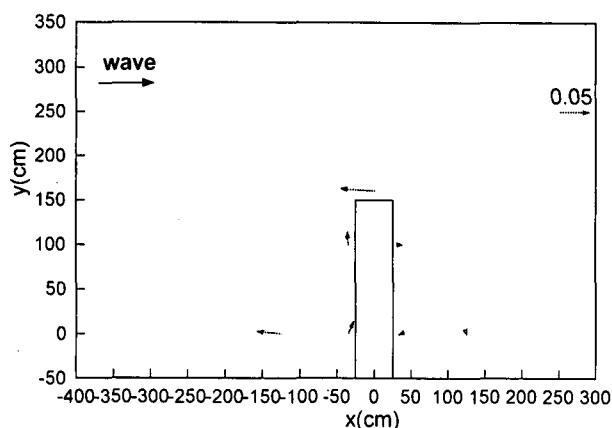


図-8 平均流ベクトルの空間分布
(オイラー流速, $H_1=5\text{cm}$, $T=1.4\text{s}$, $z=10\text{cm}$)

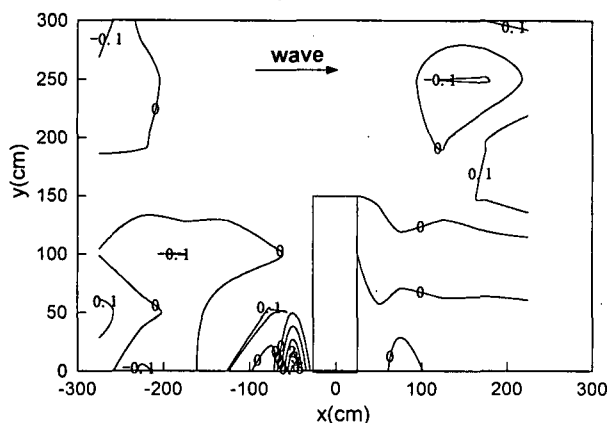


図-9 平均水位の空間分布 ($H_1=3\text{cm}$, $T=1.0\text{s}$)

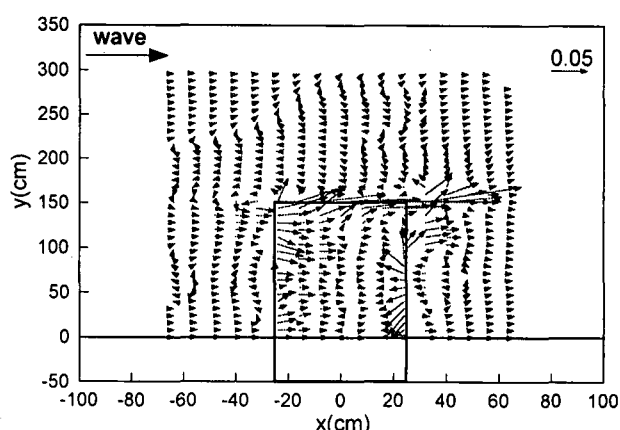


図-10 平均流ベクトルの計算結果
($H_1=5\text{cm}$, $T=1.0\text{s}$, $z=-5\text{cm}$)

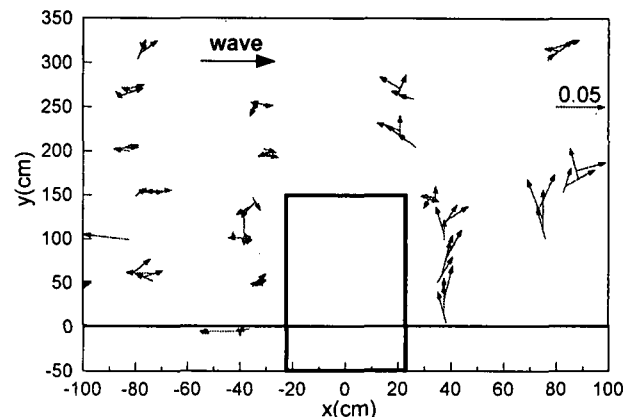


図-11 平均流ベクトルの実験結果
($H_1=5\text{cm}$, $T=1.0\text{s}$, $z=-5\text{cm}$)

ていた。ただし、値は非常に小さく、フロートの実験結果も判断すれば、この水深での流れの向きを判断するにはさらなる追加実験が必要である。一方、構造物前面では、冲向きの戻り流れが一般的に形成されているようである。そして、その流速の大きさは、入射波高が大きいほど大きくなっていた。フロートによる平均流の計測結果からは、いずれも構造物前面では構造物から若干離れたところで冲向きの戻り流れが形成されており、また、構造物近傍で沿岸方向に構造物中央から外側への流れが生じるなど、共通の傾向が認められた。しかし、ラグランジュ流速には、ストークスドリフトと同様の機構で、水粒子の上下運動に起因する往復時の流速差による残差成分が含まれるため、必ずしも両者の結果は一致しない。

ところで、波の非線形性に伴う質量輸送とそれとともに生じる運動量輸送の空間分布が一様でないことが平均流の形成機構として考えられる。そこで、平均水位の空間分布と平均流の関係について考察する。図-9に、平均水位の空間分布を例示する。これより、構造物前面中央部に平均水位が上昇する範囲があり、一方、それより沖側の領域でやや平均水位の低下が生じる。また、構造物背後には $y=100\text{cm}$ の近傍に平均水位の低下した部分が広がっているのに対し、逆に開口部の岸よりの範囲でやや平均水位の

高い部分がある。流れ場を考察するには、平均水位だけではなくラジエーションストレスの影響なども同時に考える必要があるが、平均水位の上昇した部分から下降した部分へ平均的に水の流れが生じると考えれば、本実験結果は、電磁流速計による流速の計測結果から得られる平均流の特性とよく合致していると考えて良さそうである。また、図-5～7に示したラグランジュ流速を総括的に判断すると、平均水位の上昇している構造物前面での冲向きの流れなどは定性的には平均水位の空間分布と整合していると判断できよう。

図-10に平均流速の数値解析結果を示す。また、比較のため、同一条件におけるフロートによるラグランジュ流速の実験結果も図-11に示す。まず、数値解析結果より、構造物内部で平均流が外部に比べて大きくなっている。これは、数値計算は実流速に基づいて定式化しており、その結果を示したためである。実際には透水性構造物内では、礫の存在する範囲は水は流れることはできず、水は空隙部分のみを流れる。したがって、流量流速で比較すれば構造物内外の流速差は縮小する。

さて、フロートによるラグランジュ流速の結果より、大きさとしては沿岸方向の流速と比して小さいものの、構造物前面から内部へと入り込む流れの成分が存在することが確認できる。さらに、構造物背

後でも岸向きの流れがあり、このことから構造物内部からも若干の流出があると考えられる。図-5～図-7に示した結果からも、沿岸方向に比べてかなり小さく、また、ベクトルの向きにばらつきはあるものの、構造物前面で構造物内部に向かう流れも存在することが確認できる。すなわち、水粒子の奇跡をトレースすると、構造物外部から内部に向かう運動が存在することを示している。

一方、数値解析結果は、オイラー流速であり、ストークスドリフトに相当する効果を含んでいないため、直接ラグランジュ流速の結果と比較はできないが、構造物内部で沖側から岸側へ向かう流れが形成されることが確認できる。これらの結果は、本研究で考えているような礫間浄化を行う場合、礫層内で浄化された水が港内側へ輸送されることを示唆するものであり、港内の水質の改善の観点からは望ましい流れであるといえる。

ところで、数値解析結果からは、構造物隅各部近傍、特に側面周辺に非常に特徴的な大きな流れが生じているのが分かる。図示していないが、数値解析結果と流向は異なるものの、構造物の隅各部近傍で構造物内部へと流れ込む特徴的な流れが形成されている場合もいくつかの場合で確認されており、構造物の隅各部近傍の流れが透水性構造物近傍の流れ場に大きな影響を及ぼしていることが推察される。

6. 結言

以上、本研究では、透水性構造物周辺の流れ場の特性について、水理実験結果と数値解析結果に基づいて検討を加えた。本研究で得られた主要な結論を以下に要約する。

- 1) 防波堤前面海域では反射波と入射波の干渉により部分重複波の場が形成される。一方、防波堤の直背後はかなり波高が小さく静穏な海域となる。また、平均水位は、防波堤前面で背後に比べて上昇傾向にある。
- 2) 防波堤前面の定常流は平均水位の勾配とほぼ一致した向きに流れる傾向がある。一方、構造物側方、および背後では平均水位との対応は明確ではなく、また、水深によって傾向が異なる。
- 3) 水理実験結果より、構造物内部の流れは外部に比べてかなり小さいものの、港外側から港内側へ向かう流れのあることが明らかとなった。

4) 波高分布の比較より、本研究で採用した数値解析手法は、水理実験結果と良好に対応していることが確認された。数値解析結果によれば構造物内部には明瞭な定常流れが確認された。

謝辞：本研究を行うにあたり、運輸省第五港湾建設局より援助を賜った。ここに記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 辻博和・喜田大三・藤井慎吾・石垣衛・宮岡修二・小林真：石積み浄化堤による海水浄化工法の開発－その1：実海域の浄化堤実証施設における水質浄化の初期特性－，大林組技術研究所報，No.49，pp121-124，1994。
- 2) 藤井慎吾・喜田大三・辻博和・宮岡修二：石積み浄化堤による海水浄化工法の開発－その2：実海域の浄化堤実証施設における生物相と水質浄化能－，大林組技術研究所報，No.50，pp107-112，1995。
- 3) 宮岡修二・辻博和・石垣衛・喜田大三・藤井慎吾・小林真：石積み浄化堤による海水浄化工法の開発－その3：実海域の実証施設における浄化性能－大林組技術研究所報，No51，pp99～104，1996。
- 4) 小田一紀・岡木良治・大屋博史・倉田克彦：海水浄化への生物膜法の応用に関する基礎的研究，海岸工学論文集，第37巻，pp838～842，1990。
- 5) 小田一紀・岡木良治・齋藤美香・倉田克彦：生物膜の海水浄化効果に関する水槽実験，海岸工学論文集，第38巻，pp871～875，1991。
- 6) 小田一紀・貫上佳則・重松孝昌・大屋博史・綱潔之・倉田克彦：礫間生物膜の海水浄化効果と現地へのその応用に関する研究，海岸工学論文集，第39巻，pp991～995，1992。
- 7) 小田一紀・貫上佳則・重松孝昌・倉田克彦・綱潔之・齋藤満・西田恭子：礫間接触酸化構造物の海水浄化特性とそれによる沿岸局所水域の浄化過程の研究，海岸工学論文集，第40巻，pp966～970，1993。
- 8) 川崎浩司：潜水構造物による碎波変形と再生過程に関する基礎的研究，名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻博士論文，181p.，1998。
- 9) 榊山勉・阿部宣之・鹿島遼一：ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析，海岸工学論文集，第37巻，pp554～558，1990。
- 10) 村上宗隆・水谷法美・岩田好一朗・下田直克：潜水浮防波堤周りの海浜流場と海浜地形に関する研究，海岸工学論文集，第38巻，pp.426-430，1991。