

透水性防波堤内外の流れ場とその支配物理量 に関する研究

STUDY ON WAVE-INDUCED FLOWS INSIDE AND OUTSIDE OF PERMEABLE BREAKWATER AND THEIR GOVERNING PARAMETERS

水谷法美¹・許東秀²・GOLSHANI, Aliasghar³・清水秀行⁴
Norimi MIZUTANI, Dong-Soo HUR, Aliasghar GOLSHANI, Hideyuki SHIMIZU

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正会員 博(工) 名古屋大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (同上)

³学生会員 M.Sc. 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (同上)

⁴正会員 名古屋市上下水道局下水道本部建設部 (〒460-0012 名古屋市中区千代田1-1-12)

This study investigates the wave-induced flow inside and outside a rectangular porous offshore structure, which is induced by the interaction between water waves and porous media. Three-dimensional experiments have been conducted to measure flow fields around the structure. Numerical simulation has been carried out to investigate the mechanism of wave-induced flow field and governing physical parameters, as well as behavior of water particles inside porous structure. Results of wave height distribution and Eulerian velocity field show fairly good agreements between numerical and experimental models. It has been confirmed that flow field is strongly affected by wave period. Other parameters such as media diameter, porosity, and resistance coefficients have been shown to affect the flow field, however, its degree depends on the wave period.

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

1. 緒言

湾奥部に位置する港湾のような閉鎖性水域では河川などから流入する富栄養化物質の量も多く、逆にその地形的特徴から水循環が悪くなる傾向があり、水環境の悪化が大きな問題となっている。こういった水域の水質浄化手法の一つとして、微生物の摂食活動と透過堤内部での汚濁物質と礫の接触による沈降を利用して汚濁物質を浄化する礫間接触酸化法が挙げられる^{1)~3)}。礫間接触酸化法の浄化効率に対しては、構造物内部での水粒子の滞留時間や構造物内部への流入量などが影響を与えることが指摘されている^{4)~7)}。しかし、どのような物理条件がこれらを制御しうるのかについては、未だ未解明な点も多く残されている。Mizutaniら⁸⁾は、BEMとFEMをカップリングさせた数値解析と水理実験に基づいて、これらの影響の解明を検討しているが、二次元の場を対象としているため、その成果を三次元場へ適用するには別途検討が必要である。一方、三次元波動場

での透水性構造物内外の流れ場について、水谷ら⁹⁾¹⁰⁾が検討を加えているが、彼らが採用している数値解析手法の制約上、これまで重要とされてきた礫径の影響まで議論することができなかった。

本研究では三次元波動場を対象に、構造物内外に形成される流れ場の実態を明らかにするとともに、その流れの機構と支配物理量を明らかにすることを目的とする。そして、三次元の波動場を対象にした非線形数値解析を行うとともに、水理模型実験を行って波動場の計測を行い、両者の比較から数値解析手法の妥当性の検証をする。さらに、この数値解析手法を使用して、支配物理量の変化にともなう流れ場の変化特性を調べ、透水性構造物内の流れに影響を及ぼす物理量について考究する。

2. 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¹¹⁾による3次元VOF法に榊山ら¹²⁾によるポーラスボディモデルを組み合わせた許¹³⁾の3次元完全非線形波浪モデルを採用する。ただし、透水性構造物内部の充填材である礫径の変化による効果も考慮できるように、式(2)のNavier-Stokesの運動方程式に慣性力項と、抗力項として線形抵抗項・非線形抵抗項を持つ修正型のMorison式を導入した⁸⁾。本研究で使用した基礎方程式を以下に示す。式(1)は連続式、式(2)はNavier-Stokesの運動方程式(x方向のみ示した)、および式(3)はVOF関数Fの移流方程式である。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = q^*, \quad q^* = q(y, z, t) / \Delta x_s \quad (1)$$

$$A \frac{\partial u}{\partial t} + B u \frac{\partial u}{\partial x} + B v \frac{\partial u}{\partial y} + B w \frac{\partial u}{\partial z} + C \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2)$$

$$+ E_x u + F_x u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} = \left(-\frac{2\nu}{3} \frac{\partial \gamma_x q^*}{\partial x} \right) / (\gamma_v g)$$

$$\frac{\partial \gamma_v F}{\partial t} + \frac{\partial (Fu)}{\partial x} + \frac{\partial (Fv)}{\partial y} + \frac{\partial (Fw)}{\partial z} = Fq^* \quad (3)$$

ここで、

$$A = \frac{1}{\gamma_v g} \left(1 + \frac{1 - \gamma_v}{\gamma_v} C_a \right), \quad B = \frac{1}{\gamma_v^2 g}, \quad C = \frac{1}{\rho g}$$

$$E_x = \frac{6[(1 - \gamma_y) + (1 - \gamma_z)] C_{D2} \nu}{g \gamma_v^2 D^2}, \quad F_x = \frac{1}{2} \frac{C_{D1} (1 - \gamma_z)}{g \gamma_v^3 D}$$

であり、 u, v, w : それぞれ x, y, z 方向の実流速成分、 $q(y, z; t)$: 造波位置 $x=x_s$ でのわかだし強さ、 Δx_s : $x=x_s$ での x 方向のメッシュ長さ、 t : 時間、 g : 重力加速度、 ρ : 流体の密度、 F : VOF関数、 β : 付加減衰領域でのみ正の値を持つ減衰係数、 γ_v : 体積空隙率(=) γ)、 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$: それぞれ x, y, z 方向の面積空隙率(=) γ)、 τ : セン断応力、 ν : 動粘性係数、 C_a : 付加質量係数(= $1 - C_M$)、 C_M : 慣性力係数、 C_{D1} : 非線形抗力係数、 C_{D2} : 線形抗力係数、 D : 礫径である。

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法のスキームにしたがって差分法によって解いた。また以上の計算により、波動場のオイラー流速が求められるが、構造物内外の水粒子の運動軌跡を議論するにはラグランジュ的な扱いが必要なため、特定の点においた水粒子の運動を格子点ごとに与えられる流速値を用いて内挿することにより水粒子の軌跡を計算した¹⁰⁾。

3. 数値計算の妥当性の検証

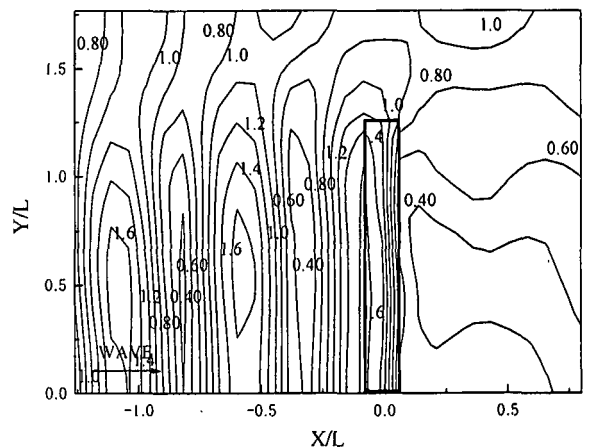
まず本数値解析手法の妥当性についての検証を行った。検証には水谷ら^{9),10)}が行った3次元水理模型実験による波高分布とオイラー流速の計測結果を使用した。水理実験の実験条件は、礫径 $D=3\text{cm}$ 、静水深 $h=30\text{cm}$ 、堤幅 $B=30\text{cm}$ を一定とし、入射波の周期を $T=1.0, 1.4, 1.8\text{s}$ の3種類、波高を $H_1=5, 9\text{cm}$ の2

種類変化させ、また構造物の堤長を $\ell=500, 550, 600\text{cm}$ の3種類変化させた。

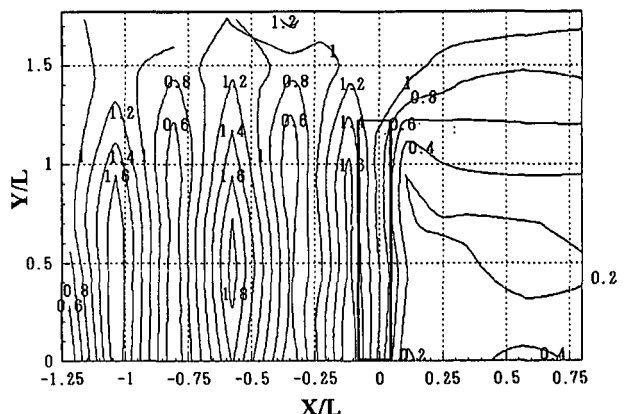
ところで、本計算で使用したNavier-Stokesの運動方程式に含まれる抵抗項は慣性力係数 C_M と非線形抗力係数 C_{D1} 、線形抗力係数 C_{D2} の2つの抗力係数を含む形で与えられている。これらの係数は流体中に存在する物体の形状などに依存して異なる。充填材を変化させた場合、同じ径や空隙率であったとしても形状が異なると抵抗係数は変化することとなる。よって慣性力係数や抗力係数を変化させることにより内部充填材の形状の変化による影響も考慮できるものとする。

まず、これらの抵抗係数を変化させた場合の波高分布の変化特性から、以下のことが明らかとなった。すなわち、慣性力係数が大きくなるほど構造物内部での波高が大きくなり、構造物背後での波高は小さくなる。また、非線形抗力係数が大きくなると、構造物背後での波高が下がる傾向が認められた。これは、非線形抗力係数が大きいほど構造物内部でエネルギーの減衰が大きくなることから、透過波が小さくなったと考えられる。一方、前面での波高については明確な傾向は明らかにできなかった。

慣性力係数などの抵抗係数の適当な値を、これらの計算結果と実験結果を比較し、最も良い一致を与



(a) 計算結果



(b) 実験結果

図-1 波高分布の比較例
($T=1.4\text{s}$, $H_1=5\text{cm}$, $\ell=550\text{cm}$)

える係数を採用することとした。その結果、最適と思われる値はそれぞれ $C_M=1.44$, $C_{D1}=0.75$, $C_{D2}=6.25$ であった。図-1(a)と(b)は入射波周期 $T=1.4s$, 入射波高 $H_1=5cm$, 提長 $\ell=550cm$, 体積空隙率 $\gamma=0.36$ に対する実験結果と計算結果を示したものである。なお, x と y は構造物の中心の静水面上に原点を持つ水平軸で, x は入射波の進行方向, y は半時計回りに 90° 回転した向きをそれぞれ正の向きとする。

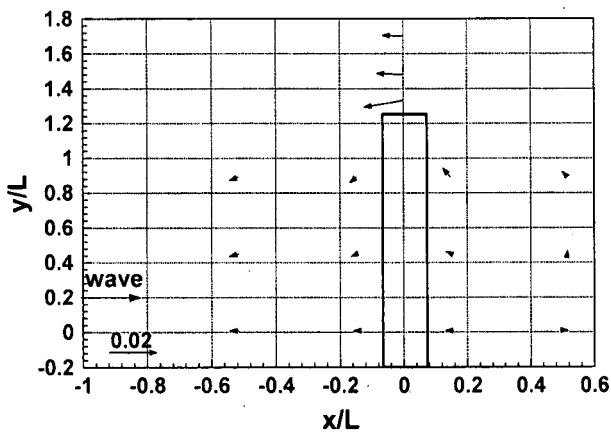
数値解析による結果は実験により得られた結果に比べて, やや構造物前面の反射波高の値が低く, 背後での透過波高がやや大きくなる傾向があるものの, 構造物前面に形成される部分重複波の特性や構造物側方からの波の透過など, 全体としての波高分布を妥当に再現しているとみなせる。さらに, 構造物の背後には構造物が存在することにより現れる静穏域が広がりや開口部から背後へと広がる波の回折現象なども良好に再現されているといえる。

波高分布における計算結果と実験結果の差は, 抵抗係数を全ての条件に対して総合的に判断して一組だけ決めており, その値が個別の条件に対して最適ではなかったことに起因すると考えられる。

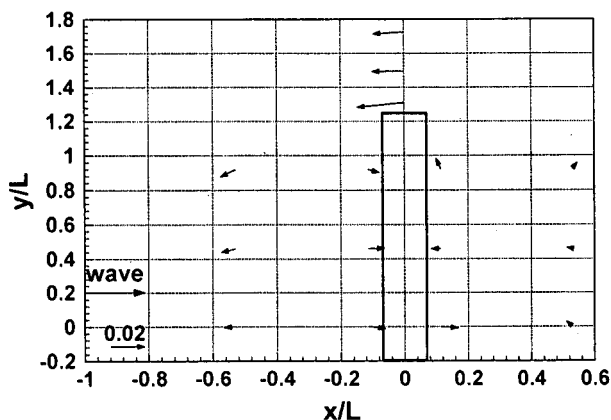
つぎに波高分布から評価された抵抗係数を使用したオイラー流速の計算結果を実験結果と比較する。入射波周期 $T=1.4s$, 入射波高 $H_1=5cm$, 提長 $\ell=550cm$,

体積空隙率 $\gamma=0.36$ の場合の $z=-15cm$ の位置におけるオイラー流速の実験結果と数値解析結果を図-2(a)と(b)にそれぞれ示す。流速は $\bar{v}/\sqrt{gH_1}$ ($\bar{v}=(u, v)$)の無次元値を示しており図中左下端の矢印はその基準値として $|\bar{v}|/\sqrt{gH_1}=0.02$ の大きさを示している。

この結果から, 流速値の比較的小さな構造物前面での流速の向きには若干違いが出ているものの開口部を岸側から沖側へと向かう戻り流れが形成される様子や開口部での構造物端部からの距離の違いによる流速値の大きさの変化や, 構造物前面の少し離れた部分で沖に向かう流れなどが良好に一致しており, 本計算手法は水理実験によって得られた流れ場を妥当に再現しうるものと判断できる。なお, 著者らのこれまでの数値計算^{9),10)}では開口部に岸向きの流れが得られていたが, これは, 計算では岸側に開境界を与えていたことによる。すなわち, 実験では消波用の一様勾配斜面が設置してあるのに対し, 従来の計算では一様水深に開境界を接続させていたため, 開口部の流向に差が認められたが, 図-2の計算では, 岸側の境界条件として, 実験と同様の1/10の一様勾配斜面を考慮した。その結果, 実験結果と良好な対応が得られたことから, 岸側の境界条件が流れ場に大きな影響を及ぼすことが判明した。

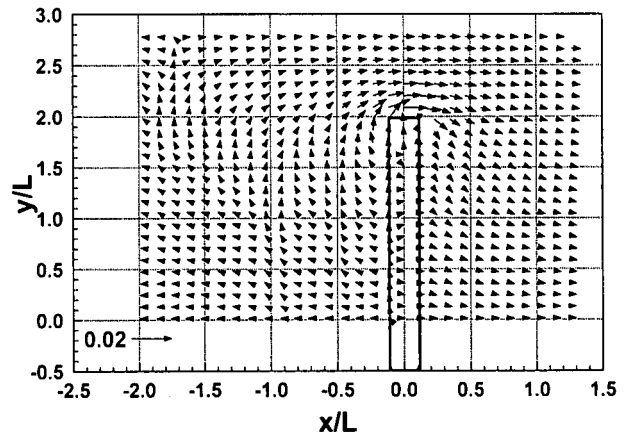


(a) 計算結果

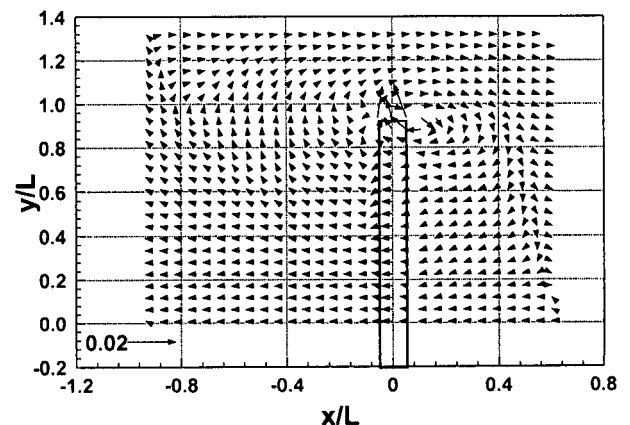


(b) 実験結果

図-2 オイラー流速の計算値と実験値の比較例
($T=1.4s$, $H_1=5cm$, $\ell=550cm$, $z=-15cm$)



(a) $T=1.0s$



(b) $T=1.8s$

図-3 流速場におよぼす周期の影響
($H_1=5cm$, $\ell=550cm$, $z=-15cm$)

4. 流れ場の特性

以上の結果より、本数値計算の妥当性が検証されたので、以下に種々の物理量が流れ場に及ぼす影響を数値計算結果に基づいて定量的に評価していくこととする。

図-3(a)と(b)にそれぞれ周期 $T=1.0s$ と $T=1.8s$ の場合の $z=-15cm$ の位置における平均流場の計算結果を示す。両者を比較すると周期の長い $T=1.8s$ の場合には開口部を沖側から岸側へと抜け、構造物背後へ回り込んで背面から構造物内部へと向かう形の時計回りの循環流が形成されるのが確認できる。一方、 $T=1.0s$ の場合にはそのような明瞭な循環流は確認できず、全領域において構造物の前面から後面へと抜けるような一方向的な流れが形成されている。図示していないが、この循環流は周期の長いものほど規模が大きくなることが判明した。

同様の比較計算を礫径や空隙率などを変化させて行った結果、礫径を大きくしても全体としての流れ場の様子に大きな変化は見られない。しかし、構造物内部での流速値が大きくなる傾向のあることが確認された。また、空隙率や慣性力係数、抗力係数を変化させた場合も、流速値は変化するものの、循環流のパターンの変化など、形成される流れ場が大きく変化する様子は確認できなかった。

これらの結果より、構造物の内外に形成される流れの全体的な場を支配する重要なパラメータとして周期が挙げられることが明らかとなった。

5. 構造物内部の水粒子の運動

数値計算によって求められたオイラー流速から水粒子をラグランジュ的に追跡し、その奇跡を計算することにより構造物内部における水粒子の挙動について検討を加えた。

図-4は周期 $T=1.0s$ 、波高 $H_1=5cm$ 、堤長 $\ell=550cm$ の場合の水粒子の軌跡を例示したものである。このように水粒子の三次元的な軌跡を求めることが可能であるが、その運動は開口部に近づいていくほど沿岸方向の運動の大きさは若干大きくなるものの、鉛直

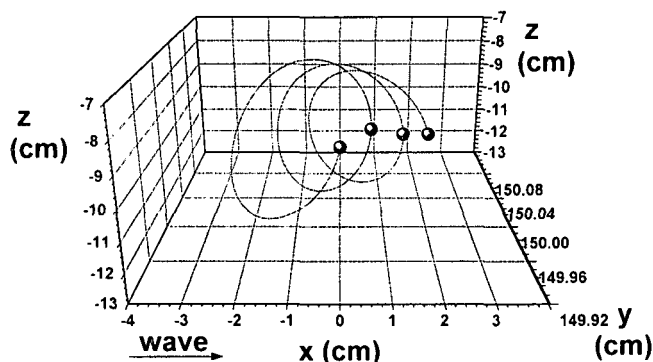


図-4 水粒子の奇跡の計算例 ($T=1.0s$, $H_1=5cm$, $\ell=550cm$, 初期位置: $x=0cm$, $y=150cm$, $z=-10cm$)

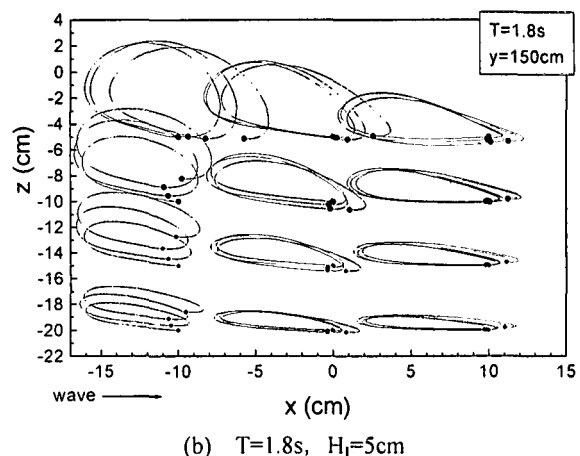
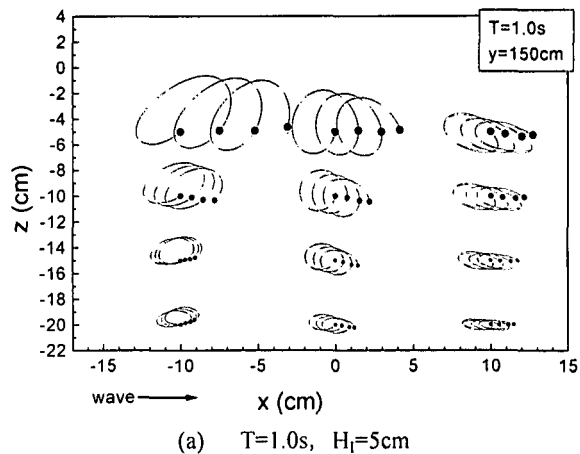


図-5 水粒子の運動に及ぼす周期の影響

方向や岸沖方向の運動の大きさに比べると非常に小さいため、ここでは鉛直二次元の水粒子の運動について考察することとする。

図-5(a)と(b)は構造物内部の沿岸方向位置 $y=150cm$ の位置における異なる位置の水粒子の軌跡を周期 $T=1.0s$ と $1.8s$ の場合について示したものである。同図からわかるように、入射波の周期に関係なく水粒子の運動は初期位置の水深が浅いほど（自由表面に近いほど）大きくなる。また水粒子の位置が岸側に近づくほど鉛直方向の運動に比べて岸沖方向の運動が卓越し、扁平な奇跡を描くようになる傾向がある。図-1(a)に示した波高分布より、透水性構造物内部でも波高に差があり、沖側から岸側に向かって波高は小さくなる。また、構造物内部では、沖側では部分重複波の腹の性質が強いが、岸側に向かって進行波の性質が強くなっていくと考えられる。この内部の波動場の性質と波高の変化が重なってこのような水粒子の軌跡の特性が得られたものと考えられる。

これらの水粒子の運動に及ぼす入射波の周期の影響に着目すると、明らかに入射波周期の長い方が水粒子の運動軌跡は大きくなる。ただし、周期が長くなると鉛直方向の運動は水平方向に比べて相対的に小さくなるため、鉛直方向よりも水平方向の水粒子の移動量の増加が顕著である。

つぎに礫径を変化させた場合の水粒子の運動の比較を行う。図-6に $T=1.0s$, $H_1=5cm$ の場合について、

初期水深 $z=-10\text{cm}$ ，沿岸方向位置 $y=-150\text{cm}$ の位置における水粒子の軌跡を， $D=2\text{cm}$ と $D=4\text{cm}$ の場合について示したものである．同図に例示されるように，水粒子は礫径が大きくなるほどその運動の規模が大きくなる．これは，本数値計算で考慮している抵抗項が礫径が大きくなると小さくなることによると考えられる．

同様の検討を空隙率に対して行った結果，水粒子の軌跡は空隙率が大きくなるほどその規模も大きくなることを確認された¹⁴⁾．

これらの結果を定量的に評価するため，水粒子の波一周期内の移動量に及ぼす礫径の影響と空隙率の影響を異なる波の周期に対して比較した結果を図-7と図-8に示す．図-5に例示したように，水粒子の運動は周期が長い方がその規模は大きくなるが，netの移動量は逆転する．すなわち，図-7と8に認められるように，同一の礫径や空隙率に対しては周期の短い方がnetの移動量は大きくなる傾向がある．礫径の単独の影響に着目すると，図-7からわかるように， $T=1.0\text{s}$ の場合は軌跡の規模と同様に，礫径の大きい方が移動量は大きくなるが，周期が長い $T=1.4\text{s}$ と 1.8s の場合は逆に礫径の小さい方が移動量は大きくなる．すなわち，入射波の周期により移動量に及ぼす礫径の効果は異なることになる．

一方，図-8に示した空隙率の効果は礫径の影響よりも若干複雑になっている．すなわち， $T=1.0\text{s}$ の場

合は空隙率の増加にともない単調にnetの移動量は大きくなるが，逆に $T=1.4\text{s}$ の場合は空隙率の増加にともないnetの移動量は単調に減少する．これらに対して $T=1.8\text{s}$ の場合，空隙率の増加にともない一度減少した後再び増加する．

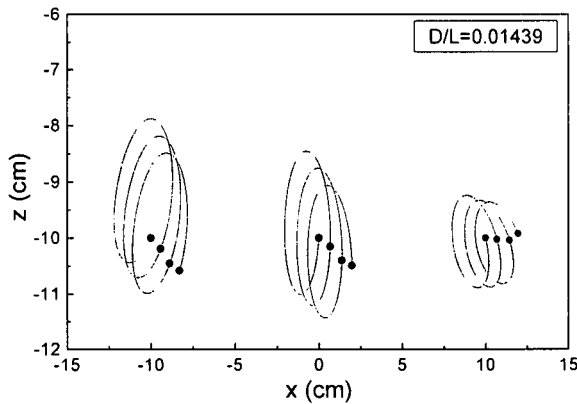
また，慣性力係数や抗力係数を変化させた場合のnetの移動量を比較した結果，やはり入射波の周期によってその影響が異なることが判明した¹⁴⁾．

以上より，水粒子の運動の大きさとnetの移動量は必ずしも対応しないこと，また，netの移動量は空隙率や礫径などの構造物のパラメータにより変化するが，その特性の変化は入射波の周期により異なることが明かとなった．

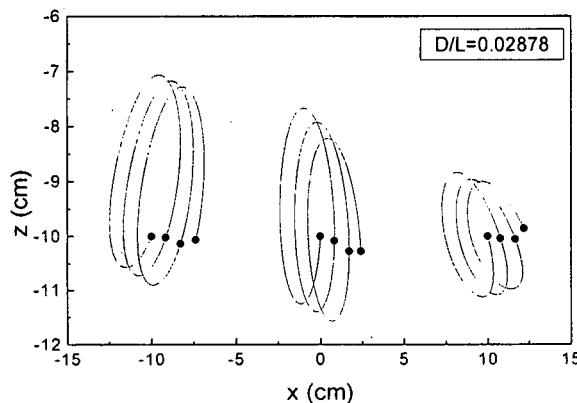
6. 結言

本研究では，透水性構造物内外の流れ場の実態とそれを支配する波浪条件や構造物条件などの物理支配量を解明するため，主に数値計算結果に基づいて考究した．本研究で明らかとなった結果を以下に要約する．

- 1) 透過性構造物内外の波動場を解析するため，Morison型の抵抗項を外力に持つ運動方程式に基づく3次元数値計算手法を提案した．本計算手法による計算結果は実験結果と良好に一致し，



(a) $D=2\text{cm}$



(b) $D=4\text{cm}$

図-6 水粒子の軌跡に及ぼす礫径の影響
($T=1.0\text{s}$, $H_1=5\text{cm}$, $z=-10\text{cm}$, $\ell=550\text{cm}$)

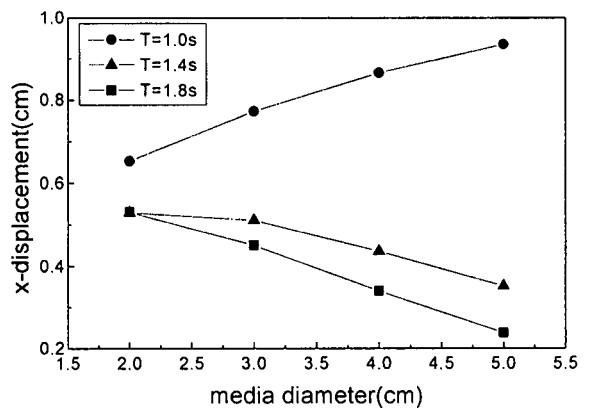


図-7 移動量に及ぼす礫径の影響
($H_1=5\text{cm}$, $z=-10\text{cm}$, $\ell=550\text{cm}$)

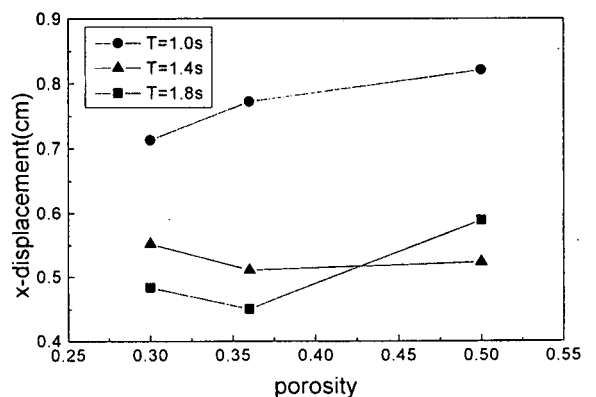


図-8 移動量に及ぼす空隙率の影響
($H_1=5\text{cm}$, $z=-10\text{cm}$, $\ell=550\text{cm}$)

- その妥当性が確認できた。
- 2) 平均流場に及ぼす入射波の周期の影響は大きく、周期の長い場合と短い場合では循環流の形成など流れ場に明瞭に差が現れる。
 - 3) 水粒子の軌跡から構造物内部での水粒子の運動は、水粒子の位置により変化し、その規模は初期水深が深いものほど小さくなる。また、岸側に位置するほど運動軌跡が扁平になる。
 - 4) 礫径が大きいほど構造物内部の水粒子の運動の規模は大きくなり、また、空隙率が大きいほど運動の規模は大きくなる。
 - 5) netの移動量は必ずしも水粒子の運動の規模に比例しない。また、礫径や空隙率にともなう移動量の変化は入射波の周期によって変化する。

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，pp.121-124，1994.
- 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，pp.107-112，1995.
- 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，No.51，pp.99～104，1996.
- 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，pp.838～842，1990.
- 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，pp.871～875，1991.
- 6) 小田一紀・貫上佳則・重松孝昌・大屋博史・網潔之・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，pp.991～995，1992.
- 7) 小田一紀・貫上佳則・重松孝昌・倉田克彦・網潔之・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，pp.966～970，1993.
- 8) Mizutani, N. and Mostafa A.M. : Wave-Induced Flow in a Porous Vertical Breakwater, Proc. of 10th ISOPE, Vol.3, pp.625-632, 2000.
- 9) 水谷法美・許東秀・平野善弘・清水秀行・Golshani, A. : 透過性構造物周辺の流れ場の特性に関する研究，海洋開発論文集，Vol.16，pp.41-46，2000.
- 10) 水谷法美・Golshani, A.・許東秀・平野善弘・清水秀行：透水性防波堤内部および周辺に形成される波浪流の特性に関する研究，海岸工学論文集，第48巻，pp.791-795，2001.
- 11) 川崎浩司：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，名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻博士論文，1998.
- 12) 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，pp.554～558，1990.
- 13) 許東秀：潜堤による多方向不規則波の砕波特性と潜堤上の構造物に作用する波力特性に関する基礎的研究，名古屋大学大学院工学研究科博士論文，2000.
- 14) 清水秀行：透過性構造物内外の流れ場とその支配物理量に関する研究，名古屋大学大学院工学研究科修士論文，40p.，2000.