

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

水谷 法美* ・ Golshani Aliasghar** ・ 許 東 秀***
平野 善弘**** ・ 清水 秀行*****

1. 緒 言

近年、波浪制御構造物には、本来の波浪制御機能に加えて環境面等からの付加機能を有する複合機能型構造物としての性能が要求されるようになってきている。一般に港湾は半閉鎖性水域を形成し、水質が悪化する場合が多い。したがって、防波堤などの波浪制御構造物に海水浄化機能を付加することが可能となればその設置価値は高い。特に、透過性ケーソン内に礫を満たして礫間浄化機能を持たせた構造は、透水層による消波機能と礫間浄化機能とを有する複合機能型構造物として実現性が高い。

礫間浄化機能に関しては、辻ら(1994)、藤井ら(1995)、宮岡ら(1995)が、実海域で石積堤の評価を行ない、その水質浄化機能を確認している。しかし、浄化効率を考えるには、生物面だけでなく物理面からの検討も必要である。小田ら(1990; 1991; 1992; 1993)は、礫の代表粒径が小さいほど、また断面平均流速が大きいほど反応速度(浄化速度)が大きくなることや滞留時間や水温などが浄化率の支配要因であることを明らかにしている。すなわち、礫間浄化が有効に機能するには、構造物内で生物作用が行われるだけの十分な滞留時間が確保されるとともに、適度な流れによって構造物内部と外部での海水の交換が行われる必要がある。水粒子の往復運動が卓越する波動場ではこれらを両立させるのは必ずしも容易ではなく、それらを制御できる技術の構築が要求される。そのためには透水性構造物内の流れ場の特性を解明する必要がある。

三次元の波動場では、透水性構造物内の流れ場は構造物周辺の波・流れ場との相互作用の結果として生じるため、構造物内部の流れ場を周辺の波・流れ場と関連づけて考究する必要がある。本研究では、これまでの検討(水谷ら, 2000)に加えて、三次元の full nonlinear の数値解析手法と水理模型実験の両面から、波・透水性防波堤の

非線形相相互作用と周辺に形成される波浪流の実態とそのメカニズムを明らかにするとともに、構造物内外での水粒子の運動と質量輸送の制御手法について考究する。

2. 水理実験

透水性構造物周辺波動場の波・流れ場を計測するため平面波浪水槽(28 m×8 m×0.8 m)で水理実験を行った。水槽内に金属フレーム内に礫材を満たした透水性防波堤(堤長 $\ell=5, 5.5, 6$ m, 堤幅 $b=0.3$ m, 空隙率 $\lambda=0.4$)を設置し、構造物周辺 119 地点で水位変動を電気容量式水位計で計測した。なお、礫材をガラス球(直径 $D=30$ mm)と砂利(中央粒径 $D_{50}=26$ mm)の 2 種類変化させた。

流れ場について、フロートによる Lagrange 流速の計測(水谷ら, 2000)と電磁流速計による Euler 流速の計測を行った。Lagrange 流速は、同時に投入された 72 個のフロートのビデオ画像をパソコンに取り込んで、各静止画像から読みとった座標の時間変化から計算した。実験では、フロートの流水板の位置を 4 種類変化させて同様の実験を繰り返し、異なる初期水深の Lagrange 流速を計測した。一方、構造物近傍の 15 地点で Euler 流速の計測を行った。この際、流速計の設置水深は $z=-15$ cm で一定とした。なお、 x と y をそれぞれ構造物中心から波進行方向と波峰方向の水平軸、 z を静水面から上向きの鉛直軸とする。

入射波は規則波とし、周期を 3 種類($T=1.0, 1.4, 1.8$ s)、波高を 2 種類($H_I=5, 9$ cm)変化させた。

3. 数値解析

三次元波動場における透水性構造物内外の流れ場を定量的に議論するために、三次元の full nonlinear の数値解析を行った。非線形数値解析手法については、Mizutani・Mostafa (2000) が BEM-FEM 法により二次元問題を扱っているが、本研究では三次元の波動場を対象としており、三次元場への拡張性や構造物隅各部で生じると考えられる渦流れの再現性などを考え、榊山ら(1990)によるポーラスボディモデルを VOF 法に適用した数値解析を行うこととした(許・水谷, 2001)。

* 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

** 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

*** 正 会 員 工 博 名古屋大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻

**** 正 会 員 工 修 名古屋市土木局

***** 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻

3.1 基礎式

以下に基礎式である連続式(式(1)), 運動方程式(式(2)), およびVOF関数 F の移流方程式(式(3))を示す。

$$\frac{\partial(\rho\gamma v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \gamma_i)}{\partial x_i} = q^* \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\gamma v u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j \gamma_j)}{\partial x_j} \\ = -\gamma v \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho\gamma v g_i - \rho M_i - \rho R_i + \frac{\partial(\gamma_j \tau_{ij})}{\partial x_j} \\ - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial(\gamma_i q^*)}{\partial x_i} - \beta u_i \delta_{i3} \quad (i=1\sim 3) \quad \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial(F\gamma v)}{\partial t} + \frac{\partial(F u_i \gamma_i)}{\partial x_i} = q^* \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに, x_i : 座標で $i=1\sim 3$ は x, y, z に対応, u_i ($i=1\sim 3$): i 方向の流速 (u, v, w), $q^*=q(y, z, t)/\Delta x$: 造波ソース, $q(y, z, t)$: 造波位置 $x=x_s$ でのわきだし強さ, Δx_s : $x=x_s$ での x 方向の格子長, t : 時間, g : 重力加速度, ρ : 流体の密度, β : 減衰係数, γ_v : 体積空隙率, γ_i : i 方向の面積空隙率, τ : セン断応力, ν : 動粘性係数である。また, M_i : 慣性力項, R_i : 抗力項, である。

3.2 境界条件

自由表面では, 接線方向には応力が0, 法線方向には圧力が0となるように力学的境界条件を設定した。開境界では, 付加減衰領域を解析対象領域に接続し, 徐々に波を減衰させるとともに, その外側の開境界で流速やVOF関数などすべての物理量の水平勾配が0となる条件を課した。一方, y 方向の側方境界条件として, 接線方向に対してはslip条件を, 法線方向に対しては不透過条件を適用した。

3.3 数値解析手法

本研究では, 上記の基礎方程式と境界条件を Staggered Mesh を採用した差分法により解析した。差分のスキームには SOLA 法を採用した。格子間隔は水平方向に

4 cm×4 cm, 鉛直方向に2 cm とし, 時間間隔を0.001 秒とした。

3.4 Lagrange 流速

構造物内外の水粒子の運動軌跡を議論するには Lagrange 的な扱いが必要になる。そこで上述の数値計算結果を使って以下の手順で水粒子の軌跡を計算した。

$t=t$ に (ξ', η', ϕ') にあった水粒子が, $t=t+\Delta t$ に $(\xi'^{t+1}, \eta'^{t+1}, \phi'^{t+1})$ に移動したとすると以下の近似が可能である。

$$\xi'^{t+1} = \xi' + u'(\xi', \eta', \phi')\Delta t \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\eta'^{t+1} = \eta' + v'(\xi', \eta', \phi')\Delta t \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\phi'^{t+1} = \phi' + w'(\xi', \eta', \phi')\Delta t \quad \dots\dots\dots(6)$$

すなわち, (ξ', η', ϕ') における Euler 流速 (u', v', w') が求めれば Δt 後の水粒子の位置が計算できる。しかし, Euler 流速 u, v, w は, 差分格子上の定められた点のみでしか求められておらず, 任意位置での水粒子速度を差分格子上の値から推算する必要がある。

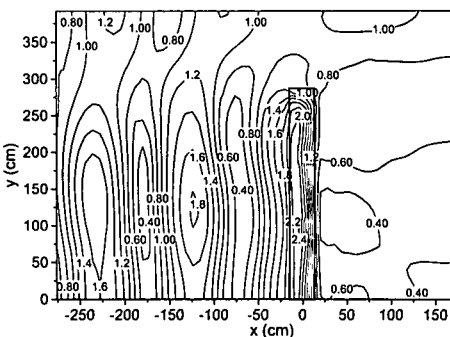
本研究では内挿関数を用いてこれらを計算することとした。すなわち, まず着目する粒子の存在するセルを求め, そのセル内の任意の点での流速を Lagrange 補間を使って差分格子上の値から計算した。

これらの操作を各タイムステップごとに繰り返し行って水粒子を移動させ, その軌跡を計算するとともに, 連続する時間ステップ間の移動距離を Δt で除すことにより Lagrange 流速とした。

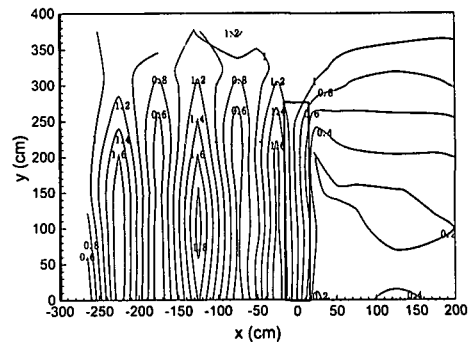
4. 結果と考察

4.1 波高分布

図-1に透水性構造物周りの無次元波高 H/H_i の分布の実験結果と数値解析結果を例示する。構造物前面で形成される部分重複波の腹と節の位置や間隔などは両者の間で非常によく一致している。一方, 構造物背後では, 静穏域が形成されるが, 構造物から離れると徐々に回折



(a) 数値解析結果



(b) 実験結果

図-1 無次元波高 H/H_i の空間分布 ($T=1.4$ s, $H_i=5$ cm, $\ell=550$ cm)

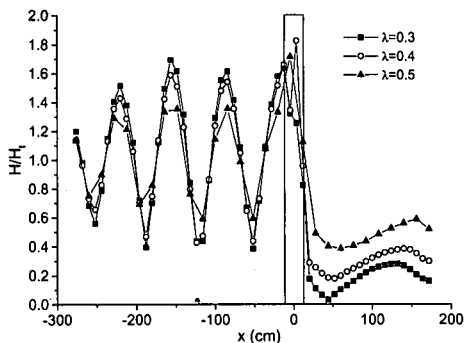


図-2 波高分布に及ぼす空隙率の影響 (数値解析)
($T=1.0$ s, $H_i=5$ cm, $\ell=550$ cm, $y=0$)

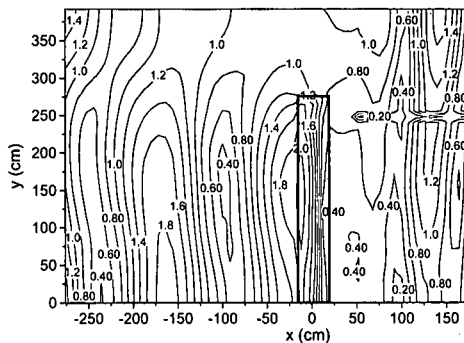


図-3 無次元波高 H/H_i の区間分布 (数値解析)
($T=1.0$ s, $H_i=5$ cm, $\ell=550$ cm)

により波高は大きくなる。ただし、背後の波高は数値解析の方が若干大きくなっているが、これは数値解析モデルでは、透水層内の充填材の流体抵抗を単一球体に対して広く使用されている $C_D=0.5$ と $C_M=1.5$ を与えており、実験における流体抵抗に若干の差があったことが一原因として考えられる。この点については今後の検討が必要である。構造物側方では、 H/H_i は 1 に近い。これは、構造物側方では入射波がそのまま透過するためであり、この点についても数値解析と実験の対応は良好である。これらの結果より、本数値解析は、実験結果を妥当に再現していると判断できる。

なお、紙面の都合上図示していないが、ガラス球を充填した場合の実験結果と、砂利を使用した実験結果を比較した結果、波高分布に有意な差はほとんどなく、充填材の形状や大きさなどの材質的な違いは波高分布には影響を及ぼさないことが確認された。

図-2 は、同一の波浪条件で構造物の空隙率を変化させた場合の波高分布の計算結果について、 $y=0$ に沿った波高の変化を示したものである。図より明らかに間隙率が大きくなるとともに腹の波高が小さくなり、逆に節の波高は大きくなることからわかる。また、構造物背後でも間隙率が大きくなると波高は大きくなることを確認できる。これらは、間隙率が大きいほど構造物の透過率が高くなるため、構造物前面での反射の影響が小さくなるとともに背後への透過波が大きくなったことによる。

図-3 に入射波の周期が長くなった場合の波高分布の結果を示す。部分重複波の腹と節の間隔が変化する以外に、腹の位置での波高、および構造物背後の波高が周期の短い場合に比べて大きくなっている。すなわち、周期が長い方が反射率が大きくなるとともに、透過率も大きくなっていることになる。反射率・透過率には構造物内部におけるエネルギー損失が影響していると考えられるが、周期の長い方が波長 L に対する構造物の堤幅 B の比 B/L が小さく、内部で消費されるエネルギーが小さく

なると推察される。

一方、図示していないが、波高を変化させた場合の波高分布については、本実験の範囲ではほとんど有意な差は生じなかった。ただし、碎波が生じると状況が変化することは容易に予想され、これについては別途検討が必要である。また、堤長が変化した場合、回折の差によって波高分布に大きな差が生じることが予想されたが、本研究で検討した範囲では若干の差が認められた程度で、概して堤長の影響は小さかった。

4.2 流れ場の特性

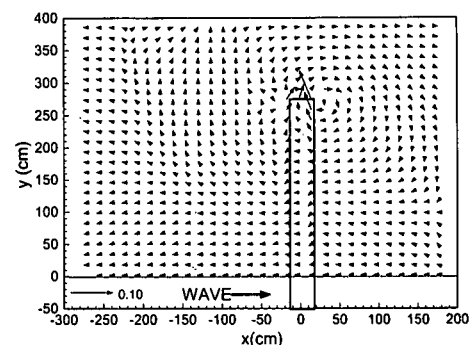
1) Euler 流速

図-4 に $\sqrt{gH_i}$ で無次元化した平均流速 $v_E/\sqrt{gH_i}$ の空間分布を例示する。実験結果より構造物前面で岸向きの流れが確認できる。それ以外は小さいものの概して沖向きの流れが多く現れる傾向があった。

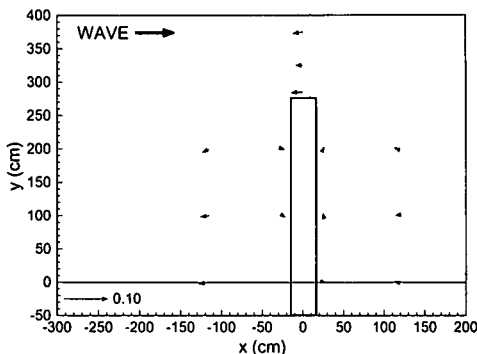
一方、数値解析結果からは構造物端部を中心に構造物前面から側方を通して構造物背後に流れ込む時計回りの循環流が確認できる。これは離岸堤などの構造物周辺によく見られる循環流であり、トンボロ地形の生成要因ともなっている。また構造物の形状などは異なるものの、村上ら (1991) による斜面上の潜水浮体周りの流れ場の計測実験からも、類似の循環流の形成が確認されている。それに対して、構造物前面で循環流から外れた部分は沖向きの流れが卓越していることが一般的な傾向として確認された。

本実験では計測箇所が少なく、循環流の確認はできないが、過去の類似の計測結果や構造物より若干離れた場所での両者の整合性からは数値解析結果は構造物周辺の流れ場を妥当に再現していると思われる。ただし、構造物前面で確認された構造物内部への流れなどは必ずしもうまく再現されているとは言い難い。これは、実験と数値解析の境界条件の差異が一因として考えられ、改善の必要性がある。

ところで、図示していないが平均水位の空間分布と比



(a) 数値解析結果



(b) 実験結果

図4 無次元流速 $v_E/\sqrt{gH_I}$ の分布例
($T=1.8$ s, $H_I=5$ cm, $\ell=550$ cm, $z=-15$ cm)

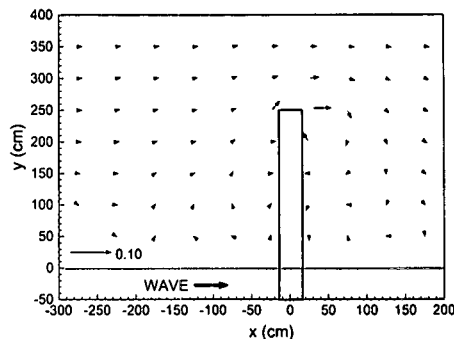
較した結果, Euler の平均流が向かう場所は全般的に平均水位の低い場所になっていることが本研究からも確認できた(水谷ら, 2000). 平均流には平均水位だけでなくラディエーションストレスの影響も同時に考える必要があるが, 今回の結果より全般的には Euler の平均流速と平均水位の特性は整合性のある結果と考えられる.

なお, 入射波の周期が長くなると, 一般に循環流の規模が大きくなる傾向のあること, また, 波高が変化した場合, 全般的に平均流が強くなる傾向のあること, そして, 構造物背後の中央付近にもう一つの循環流が生じる傾向のあることが確認された. 周期による差は波長の変化に伴う回折の程度が変化することによると考えられる. また, 波高が大きくなると構造物中央部を透過する流れが強くなり, 背後でもう一つの循環流を形成するものと考えられる.

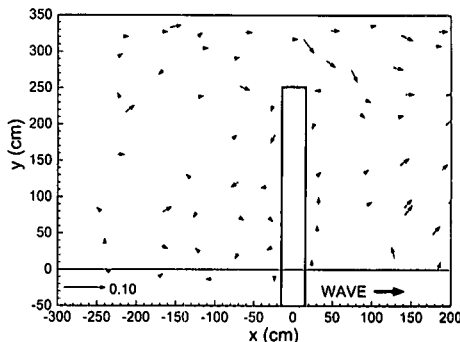
2) Lagrange 流速

図5にフロートの追跡から得られた無次元平均流速 $v_L/\sqrt{gH_I}$ の分布を例示する.

実験結果より構造物前面に時計回りの循環流らしき流れ場が形成されていることが分かる. また構造物の前面付近では, 岸向きと沖向きの流れが混在しており, 構造物内に流入する流れと構造物から流出する流れが存在す



(a) 数値解析結果



(b) 実験結果

図5 無次元流速 $v_L/\sqrt{gH_I}$ の空間分布
($T=1.8$ s, $H_I=5$ cm, $\ell=550$ cm, $z=-15$ cm)

ることがうかがえる. 一方, 構造物背後においては, 流向が細かく変化し, 後述の数値計算結果にみられるような循環流の形成は明瞭ではなかったが, 構造物背後から内部に向かう流れがいくつかの条件で確認できた.

一方, 数値解析結果からは構造物を中心とする時計回りの循環流の形成が確認できる. この循環流は周期が 1.4 s から 1.8 s へと長くなるにともない大きくなる傾向も確認されており, Euler 流速の平均流と共通の結果が得られた.

Lagrange 流速に関しては, 波高の変化が及ぼす影響は本研究の範囲内では振幅の増大以外には顕著ではない. しかし, 構造物の間隙率を変化させると, 構造物背後で間隙率の小さい方が流速が大きくなる傾向が認められた. これは構造物内部から岸側へ流出する時の速度は間隙率の小さい方が大きくなるためであると考えられる.

4.3 構造物内の流れ場

構造物内の流れは計測が困難であるため, 本研究では数値解析面からのみ考究する. 図6に例示するように, 透水層内の Lagrange 流速の値および向きは, 沿岸方向に対してほとんど変化しない. また, 周期によって分布の形状に差があるが, 一般的に浅い位置で岸向きの流れ

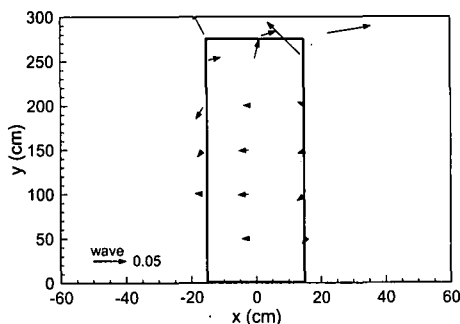


図-6 構造物内部の $v_x/\sqrt{gH_1}$ の分布
(数値解析: $\ell=5.5$ m, $z=-15$ cm, $H_1=5$ cm, $T=1.8$ s, $\lambda=0.4$)

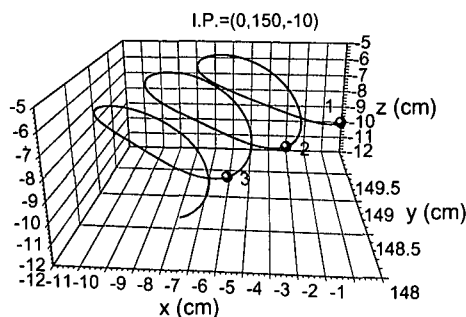


図-7 構造物内の水粒子の軌跡の数値解析結果の例
($\ell=5.5$ m, $z=-15$ cm, $H_1=5$ cm, $T=1.8$ s, $\lambda=0.4$, 初期位置 $x=0$ cm, $y=150$ cm, $z=-10$ cm)

が、逆に深い位置で沖向きの流れが卓越する傾向がある。一方、構造物周辺の流れ場に関して、Euler 流速の平均流れは周期が長くなると構造物端部を中心とした時計回りの循環流が生じることは既述したが、構造物内部の流れ場は周辺部の流向と一致していることから、構造物内部を通過する一つの大きな循環流が形成されていることが考えられる。

図示していないが、間隙率が大きくなると x 方向の質量輸送は大きくなる傾向が認められた。これは間隙率が大きくなると透水性が高くなるためであると考えられる。

最後に、水粒子の軌跡の例を図-7 に示す。透水層内の水粒子の軌跡は、波浪条件以外にも初期位置によっても変化し、そのパターンを一概に分類することは困難であるが、周期の長い方が水平方向に卓越するパターンになること、構造物の端部の方が y 方向の移動が大きくなる傾向のあることが確認できた。また、間隙率によっても軌跡が変化し、間隙率が小さくなるにともなって楕円軌道が直線的な往復運動に近づく傾向がある。

5. 結 論

本研究で得られた主要な結論を以下に要約する。

- (1) Euler 流速の平均流れは、構造物端部から構造物背後へ向かう一対の循環流を形成する。その規模は波長の長い方が大きくなる。
- (2) Lagrange 流速の平均流れも構造物背後で一対の循環流を形成する。その規模は波長、堤長に依存する。また、構造物の前面水域でも弱いながらも循環流を形成する。一方、構造物側方では岸向きの流れが常に存在する。
- (3) これらの流れは構造物内部にも定常流を発生させる。構造物内部では水面近傍で港内側へ、深部で港外側へ向かう流れが存在し、港内外の水交換を生じさす。
- (4) 構造物の空隙率は波動場、流れ場に大きく影響を及ぼすが、空隙率が同じであれば透水層内の材質の影響はあまり顕著に現れない。

参 考 文 献

- 小田一紀・岡本良治・大屋博史・倉田克彦 (1990): 海水浄化への生物膜法の実用に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 838-842.
- 小田一紀・岡本良治・齋藤美香・倉田克彦 (1991): 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.
- 小田一紀・賀上佳則・重松孝昌・大屋博史・綱 潔之・倉田克彦 (1992): 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.
- 小田一紀・賀上佳則・重松孝昌・倉田克彦・綱 潔之・齋藤満・西田恭子 (1993): 礫間接触浄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.
- 神山 勉・阿部宣行・鹿島遼一 (1990): 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.
- 辻 博和・喜田大三・藤井慎吾・石垣 衛・宮岡修二・小林 真 (1994): 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.
- 藤井慎吾・喜田大三・辻 博和・宮岡修二 (1995): 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.
- 許 東秀・水谷法美 (2001): 3次元物体に作用する碎波波力の直接数値計算, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 811-815.
- 水谷法美・許 東秀・平野善弘・沼水秀行・Golshani, Aliasghar (2000): 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.
- 宮岡修二・辻 博和・石垣 衛・喜田大三・藤井慎吾・小林 真 (1995): 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.
- 村上宗隆・水谷法美・岩田好一朗・下田直克 (1991): 潜水浮体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.
- Mizutani, N. and A. M. Mostafa (2000): Wave-Induced Flow in a Porous Vertical Breakwater, Proc. 10th ISOPE, Vol. 3, pp. 625-632.