

低天端透過式離岸堤構造物周辺の波浪場・海浜流場の解析手法の研究

Numerical Analysis for Wave and Nearshore Current Fields around Permeable Detached Breakwaters with Low Crests

西畑 剛¹・田島芳満²・佐藤慎司³

Takeshi NISHIHATA, Yoshimitsu TAJIMA and Shinji SATO

A Boussinesq type numerical model was developed which can simulate both wave fields and current fields around permeable detached breakwaters. The validity of the model was verified through measurements of waves and nearshore currents in hydraulic experiments investigating reflection and transmission capability. The porosity of the structure was accounted by a friction term incorporating turbulent resistance. The combination of turbulent friction model and anisotropic diffusion type wave breaking model turns out to reproduce not only the wave fields around the detached breakwaters but also nearshore current fields behind the structures well.

1. はじめに

我が国の侵食海岸において、対策工として透過型の有脚式離岸堤が建設される場合がある。こうした離岸堤群はMMZ計画以降に実海域で多数施工されているが、背後海域の静穏度確保ならびに海岸保全のため一定の消波性能を有することが規定され、環境および景観への配慮から透過式の低天端構造となっていることが特徴である。図-1に本研究で検討した透過型有脚式離岸堤の一つであるS-VHS工法のイメージを示す。構造物周辺では反射波浪や透過波浪のほか、構造物内部での消波や越波に伴う砕波が発生し、周辺波浪場・海浜流場は複雑となる。これらの把握および評価手法の確立は背後域の静穏度のみならず漂砂制御を考える上でも重要である。

透過型の離岸堤構造物周辺波浪場の解析については、泉宮ら(1990)、水谷ら(1995)、田島ら(2005)など多くの研究例があるが、砕波を伴う研究としてはSomchaiら(1990)、Cruzら(1992)など少ない。更に海浜流を考慮した解析としては、田島ら(2006)やRanasingheら(2009a)などに限られる。以上の研究は捨て石潜堤や消波ブロック堤のように空隙が一様とみなせる構造物を対象としているが、MMZ構造物のように複数のスリット壁からなり空隙が局所的に変化し、かつ構造物天端が常時干出して砕波を伴う構造に対する研究例は少ない。また構造物から汀線に至る周辺海域の波浪場・海浜流場に関する検証データも不足している。

本研究では、空間的に空隙率が異なる低天端透過式構

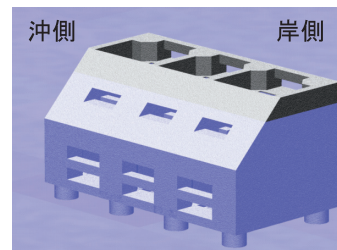


図-1 S-VHS工法イメージ

造物を非線形分散波理論によって数値解析が可能な形にモデル化し、断面水理模型実験によってその妥当性を確認する。そして平面水理模型実験によって、低天端透過式離岸堤周辺における波浪場・海浜流場の詳細を空間的に把握し、そこで観測された構造物周辺の水理現象を再現可能とする数値解析モデルを構築・検証することを目的とした。

2. 解析概要

数値計算はMadsen(1997)による修正ブシネスク方程式に透水層による遡上を考慮可能とした解析手法をベースとし、透過式離岸堤や汀線地形をモデル化する。

以下に本研究で用いる連続式、運動方程式を記す。

$$\alpha \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P_i}{\partial x_i} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{P_i P_j}{A} \right) + gA \frac{\partial \eta}{\partial x_i} + \Psi_i + D_{f,i} + D_{b,i} = 0 \dots\dots (2)$$

ここで、 η : 水位、 P : 線流量、 α : $z = \eta$ で定義される空隙率、 $A = h + \eta - (1 - \epsilon)z_l$: 空隙水深、 h : 静水深、 ϵ : 空隙率、 z_l : 透水層厚、 g : 重力加速度、 Ψ : 分散項、 D_f : 摩擦項、 D_b : 砕波項を示す。なお添字は x_i 軸上 ($i = 1, 2$)の座標を意味し、共通しない添字に対しては総和規約を

1 正会員 修(工) 東京大学大学院博士課程 工学系研究科
社会基盤学専攻
2 正会員 Ph.D. 東京大学准教授, 同上
3 フェロー 工博 東京大学教授, 同上

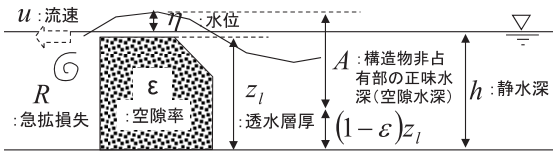


図-2 数値解析で用いる変数

適用する。数値解析に用いる変数を図-2にまとめる。

(1) 移流項の安定化

(2) 式左辺第2項の移流項は、 u_i を x_i 方向の流速とすると数値解析上、以下の式を差分することになる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{P_i^2}{A} \right) = u_i \frac{\partial P_i}{\partial x_i} + P_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式右辺第2項の流速の空間微分は、構造物による水深急変部で数値不安定を生じさせやすい。Ranasingheら(2009b)は、潜堤上を越波する波浪をNwogu(1993)によるブシネスク方程式を用いて解析しているが、移流項に急拡損失項を導入することで潜堤天端干出時も計算を安定化させている。本研究で用いるMadsen型ブシネスク方程式の運動式移流項に対しても同様の損失項として、

$$R_i = u_i^2 \frac{\partial A}{\partial x_i} \dots\dots\dots (4)$$

を付加すると、

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{P_i^2}{A} \right) + R_i = 2u_i \frac{\partial P_i}{\partial x_i} \dots\dots\dots (5)$$

(5) 式は、線流量の微分項のみ含むため数値的に安定する。構造物前後の水深変化位置に限定し、渦が発生する方向に流れが生じる場合のみ移流項を同式で置き換える。

(2) 摩擦項

底面摩擦は(2)式中の D_f であり、一般的には層流抵抗、乱流抵抗、慣性力項からなるDupuit-Forchheimer型の抵抗則で表される。しかしながら各抵抗は浸透流実験等から係数が求められるため(van Gent, 1995など)、MMZ構造物のように様々な形状種類が提案され、空隙率も部材位置毎に異なる構造に対し一般形を提示することは困難である。ここでは以下の通り速度の2乗に比例する形(すなわち乱流抵抗のみ)で構造物による抵抗を定義しておき、低天端構造であるため構造物上で碎波することを勘案し、次節で述べる碎波項と併せてエネルギーの逸散を検討する。

$$D_{f,i} = -f \frac{z_l \varepsilon}{A} u_i |u_i| \dots\dots\dots (6)$$

f は摩擦係数であり、その設定方法は次章で述べる。

(3) 碎波項

碎波による拡散係数は、田島ら(2006)が水平天端を有するブロック潜堤に適用した以下のモデルを用いる。

$$v_T = f_D \frac{gd}{\omega^2} = \begin{cases} 2.5 \tan \beta \frac{\gamma_s^2}{\gamma^2} \frac{\gamma - \gamma_r^2}{\gamma_s^2 - \gamma_r^2} \sqrt{\frac{g}{d}} \frac{gd}{\omega^2} & (\beta \neq 0) \\ 0.094 \left(1 - \frac{\gamma_r^2}{\gamma^2} \right) \sqrt{\frac{g}{d}} \frac{gd}{\omega^2} & (\beta = 0) \end{cases} \dots\dots (7)$$

$$\gamma_s = 0.3 + 4 \tan \beta \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 v_T : 拡散係数、 d : 平均空隙水深、 ω : 角周波数、 β : 海底勾配、 γ : 波峰における流速波速比、 γ_s および γ_r : 碎波の波高水深比が一定に漸近する時および碎波が再生する時の値を示す。碎波限界は流速波速比を用いたが、次章で述べる平面実験と整合する $\gamma = 0.8$ 以上とした。拡散係数は平山・平石(2004)と同様に以下の乱れエネルギーの移流・拡散・生成・逸散式より拡散係数を空間的に平滑化して与える。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{P_i}{A} \frac{\partial k}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v_T \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = P_* - \frac{C_D k^{3/2}}{l_i} \dots\dots\dots (9)$$

$$v_T = \sqrt{k} l_i \dots\dots\dots (10)$$

$$P_* = \frac{C_D}{l_i} \left(\frac{v_T}{l_i} \right)^3 \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 P_* : 定常状態における乱れの生成項、 $l_i = 1.5H_0$ 、 $C_D \approx 0.09$ 、 H_0 : 沖波波高である。

碎波モデルについては消波層型および異方拡散型の2通りについて検討する。前者は層流抵抗、後者は規則波に対して慣性力抵抗と類似したエネルギー逸散が構造物上で起こると考えられるが、その妥当性は実験にて検証する。

消波層型の碎波モデルとして以下のWatanabe・Dibajnia(1988)のモデルを用いる。

$$D_{b,i} = f_D P_i \dots\dots\dots (12)$$

f_D は(7)式より逆算する。

一方、拡散型の碎波モデルとしては、田島ら(2006)による以下の異方拡散型のモデルを用いる。同モデルは式(10)で定義した拡散係数を主波向方向にのみ適用し、開口部を有する離岸堤周辺での解析精度向上が図られている。

$$D_{b,i} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(v_{ij} \frac{\partial P_i}{\partial x_j} \right) \dots\dots\dots (13)$$

$$\begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_T \cos^2 \theta & v_{LK} \\ v_{LK} & v_T \sin^2 \theta \end{pmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

$$v_{LK} = \Lambda U_w H \dots\dots\dots (15)$$

ここで $\Lambda \approx 0.1$ 、 U_w : 底面軌道流速、 H : 波高、 θ : 碎波時の波向で岸方向を0とする。

3. 水理模型実験と再現解析

(1) 断面模型実験

西畑ら(2008)が実施した断面水槽実験を検証データとして低天端透過式離岸堤構造物のモデル化を行った。実験はMMZ計画による透過式離岸堤が建設されている海岸を参考にして条件が決定されている。モデル縮尺は1/25を想定し、規則波実験を対象とする。表-1に検討ケース、図-3に実験配置を示す。

離岸堤は部材配置に応じて、鉛直断面方向に平均化した空隙率を用いてモデル化した(図-4)。格子間隔は2cmとしており、局所的な空隙分布も概ね適合させた。モデル全体での空隙率は0.6程度となり、実構造物の空隙率0.61と整合している。ここで式(6)中の摩擦係数 f は0~2まで1.0ずつ変化させて感度分析により最適化する。図-5に合田ら(1991)による入射波分離手法による反射率・透過率を、図-6にケース2での解析時系列を摩擦係数別に例示する。ここで碎波モデルは消波層型としているが、異方拡散型の碎波モデルを用いた場合も解析結果に大きな差は見られなかった。

摩擦係数を1.0とした場合、模型前後での波高分布すなわち反射性能および透過性能はほぼ整合し、実験と解析による水位変動も概ね一致する。なお空隙率を一様に0.6で与えた場合、水位変動の再現精度は劣ったため模型の空隙配置を正確にモデル化する必要がある。以降、解析における摩擦係数は1.0として議論を進める。

表-1 断面模型実験検討ケース

ケース	波高 (cm)	周期 (s)	ケース	波高 (cm)	周期 (s)
1	12	1.6	3	12	2.4
2	12	2.0	4	12	2.8

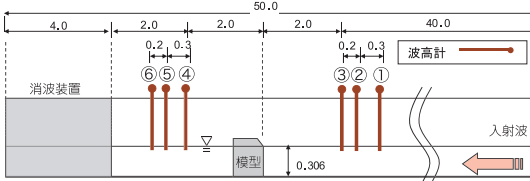


図-3 断面模型実験配置

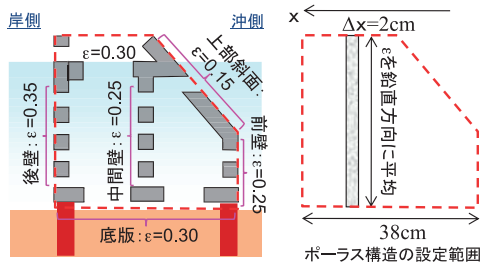


図-4 離岸堤のポーラスモデル化方法

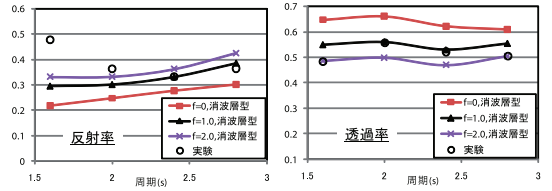


図-5 反射率・透過率の摩擦係数による違い

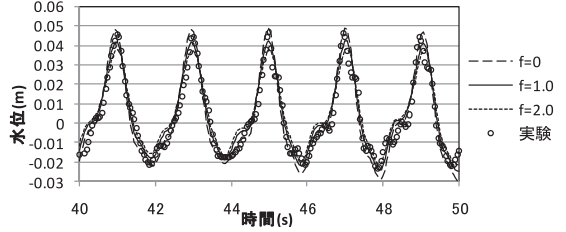


図-6 摩擦係数別解析水位変動(ケース2, 波高計⑤)

(2) 平面模型実験概要

平面実験は、単一方向規則波にて、常時波浪および高波浪を想定した波高と波向き 0° および 20° の4通りの波浪条件にて実施した。実験ケースを表-2に、実験平面および断面を図-7に示す。モデル縮尺は1/50、実験平面は造波板で反射波を吸収制御、側面には導波板を設置して完全反射境界とした。模型は1基5函にて構成し、開口部を設けて3基設置した。対照実験として模型がないケースで同条件の実験も実施している。断面実験と比べて模型縮尺は小さいが、構造的にはほぼ似たな模型を使用している。平面実験で用いた波の周期は1.5sであるが、縮尺を考慮すると断面実験での周期2.1sに相当し、反射性能・透過性能が良好に再現されることが期待できる。模型周囲には、容量式波高計、電磁流速計を配置して構造物の周辺波浪場・流況場を把握した。また計測台車に設置した波高計を移動させて模型周囲から汀線付近までの造波時平均水位の平面分布も50cm間隔で捉えた。さらに1基から2基離岸堤開口部にかけた領域の一部では下園ら(2005)によるPTV法を用いた流況場の動画解析も

表-2 平面模型実験検討ケース

ケース	模型	波浪	波高	周期	波向
1	無	常時	5cm	1.5s	0°
2	有				20°
3	無				0°
4	有				20°
5	無	高波浪	12cm	1.5s	0°
6	有				20°
7	無				0°
8	有				20°

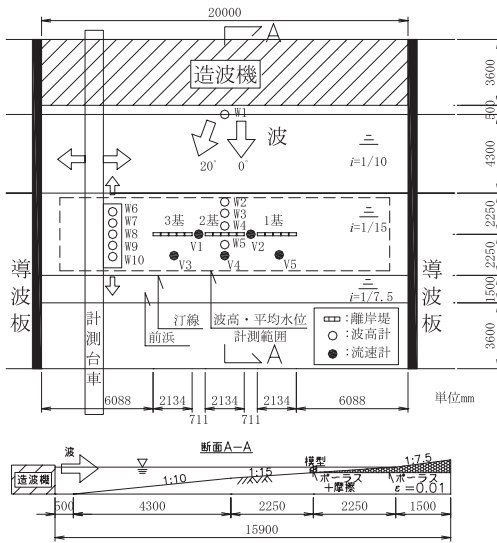


図-7 実験平面図 (上) および断面図 (下)

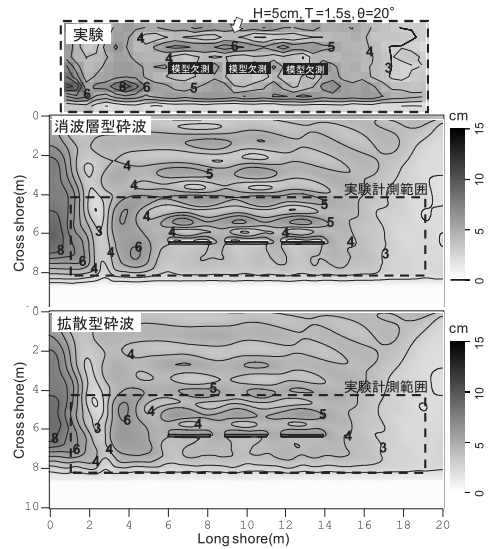


図-9 波高分布 (ケース4)

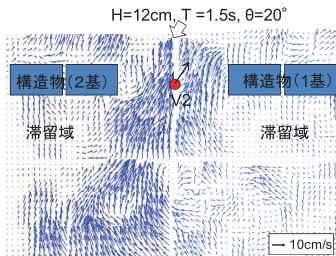


図-8 PTV法による模型周辺流況場 (ケース8)

実施している。模型なしの実験では、常時波浪で汀線より0.5m程度沖合で碎波、高波浪では汀線より1.5m程度沖合で碎波した。碎波点付近に浮子を投入した目視観測では20°の波向きをつけた実験で、碎波に伴う沿岸流が観測されている。また模型があるケースでは、高波浪時に構造物開口部において冲向きの強い海浜流が観測された(図-8)。

(3) 平面模型実験の数値解析

平面模型実験の再現解析では図-7断面図に示した解析地形を用いた。模型部は断面実験と同様に式(6)の摩擦項および透水層を設定した。平面実験では碎波帯における海浜流の精度向上も勘案し、波打帯海底も低空隙率でポーラス化している。数値解析は式(12)で表される消波層型と式(13)で表される拡散型の2通りの碎波モデル別に実施した。平面実験および数値解析における波高、平均水位、流速分布例を常時波浪(ケース4)および高波浪(ケース8)について図-9~12に示す。ここで平均水位および流速は、解析最後から2周期分の平均値を用いた。

消波層型の碎波モデルを用いた場合、離岸堤周辺における波高分布の解析精度は高い。また高波浪時に観測さ

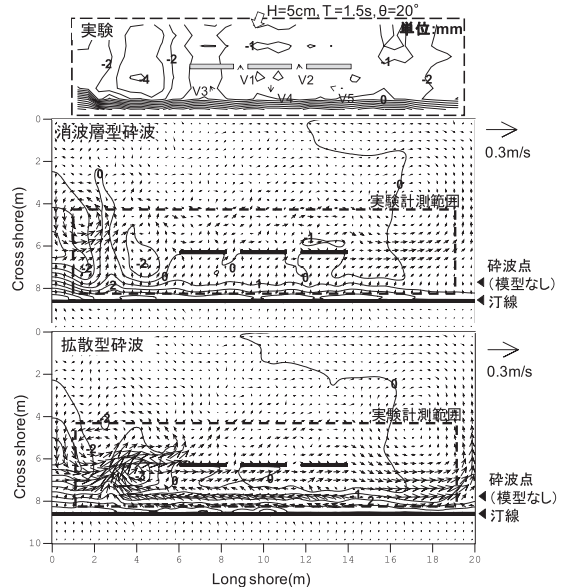


図-10 平均水位および流速分布 (ケース4)

れた離岸堤開口部からの離岸流も解析される。しかしながら斜め入射に伴う、碎波帯での沿岸流は解析されていない。田島ら(2006)も指摘している通り、碎波による減衰を波向によらず流速に比例する抵抗係数(層流抵抗)で与えるため、碎波点付近では沿岸方向の海浜流が過剰に平滑化されるためと考えられる。

一方、拡散型の碎波モデルを用いた場合、離岸堤周辺における波高分布の解析精度は、消波層型同様良好である。海浜流に関しては高波浪時に離岸堤開口部から沖へ向かう流れや背後の滞留に加え、斜め入射波の碎波に伴

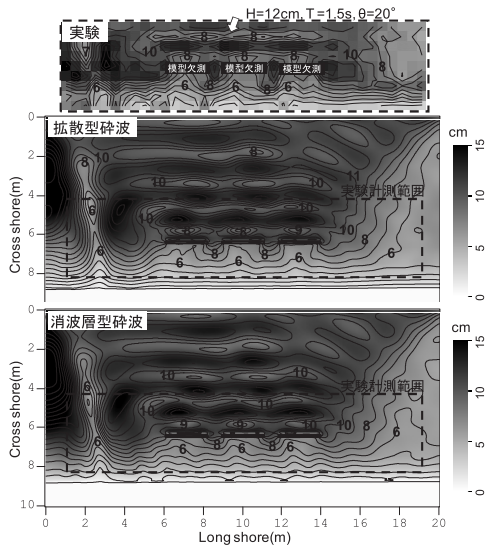


図-11 波高分布 (ケース8)

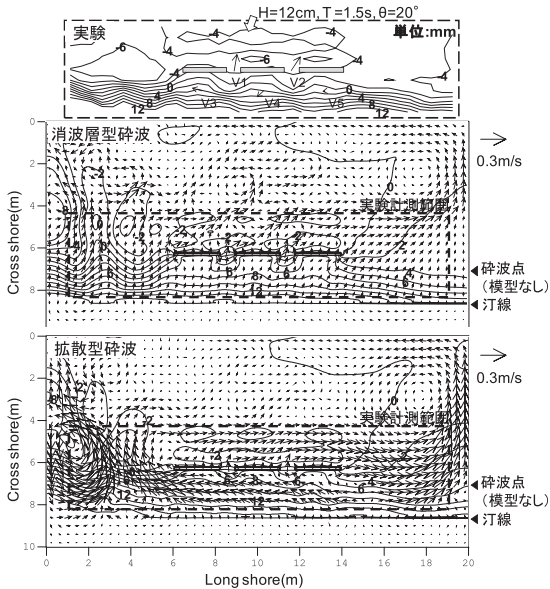


図-12 平均水位および流速分布 (ケース8)

う沿岸流の発生が入射波高によらず明瞭に解析された。

以上の議論より本研究で用いた摩擦設定方法および碎波モデルを組合せることによって低天端型離岸堤周辺の波浪場は、実用上十分な精度で解析されることがわかる。一方、構造物周辺から背後域の漂砂を考える場合、海浜流の解析精度が高い拡散型の碎波モデルが有効といえる。

4. おわりに

低天端透過型離岸堤構造物周辺の波浪場・海浜流場を

解析するため非線形分散波理論による数値モデルの検証と水理実験による検証を行った。以下に結論をまとめる。

- (1) 低天端透過型離岸堤構造物に対しては、乱流抵抗型の摩擦係数と構造物形状に応じて鉛直平均化した空隙を与えることで、重複波浪場および透過波浪場が妥当に解析される。
- (2) 低天端透過型離岸堤構造物周辺の平面波浪場および海浜流場の再現解析に対しては、異方拡散型の碎波モデルの適用が有効である。

本論文中的実験は五洋建設株式会社技術研究所の水理実験棟施設を利用した。関係者には謝意を表します。

参考文献

泉宮尊司・古俣弘和・水上 淳 (1990) : 透過性波浪制御構造物の線形抵抗係数および局所的反射率に関する研究, 海工論文集, 第37巻, pp. 544-548.

Cruz, E., 芝 和彦, 磯部雅彦, 渡辺 晃 (1992) : 透過潜堤による平面二次元非線形波浪変形の計算法, 海工論文集, 第39巻, pp. 621-625.

合田良美, 鈴木康正, 岸良安治 (1991) : 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港研資料, No.248, pp. 1-24.

下園武範, 佐藤慎司, 磯部雅彦 (2005) : 潜堤周辺における海浜流場の発達機構, 海工論文集, 第52巻, pp. 121-125.

Somchai, R., 磯部雅彦, 渡辺 晃 (1990) : 透過潜堤上における波の碎波変形計算法, 海工論文集, 第37巻, pp. 549-553.

田島芳満, 小塚将之, 大島香織 (2005) : 透過式潜堤による非碎波波浪の低減効果および評価手法について, 海洋開発論文集, 第21巻, pp. 499-505.

田島芳満, 佐藤慎司, 鈴木淳也, 下園武範, 磯部雅彦 (2006) : 潜堤周辺の碎波・乱流特性を考慮した海浜流場予測モデルに関する一考察, 海工論文集, 第53巻, pp. 106-110.

西畑 剛, 安野浩一朗, 下村直己, 山本 敦, 羽田 宏, 関本恒浩 (2008) : 波力低減型海域制御構造物の開発, 海洋開発論文集, 第24巻, pp. 525-530.

平山克也, 平石哲也 (2004) : ブシネスクモデルによる碎波・遡上計算法とその適用性, 海工論文集, 第51巻, pp. 11-15.

水谷法美, 後藤敏明, G. M. William (1995) : 潜水透水性構造物による波変形と内部流速場のハイブリッド数値解析, 海工論文集, 第42巻, pp. 776-780.

Madsen, P. A., O. R. Sorensen and H. A. Schaffer (1997) : Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part 1. Model description and cross-shore motion of regular waves, Coastal Engineering, ASCE, pp. 255-287.

Nwogu, O. J. (1993) : Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation, Journal of waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol.119(6), 618.

Ranasinghe, R. S., S. Sato and Y. Tajima (2009a) : Modeling of waves & currents around porous submerged breakwaters, Coastal Dynamics, No.12.

Ranasinghe, R. S., S. Sato and Y. Tajima (2009b) : Boussinesq modeling of waves and currents over submerged breakwaters, APAC, Vol.3, pp. 58-64.

van Gent, M. R. A. (1995) : Porous flow through rubble-mound material, Journal of waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 121(3), pp. 176-181.

Watanabe, A. and M. Dibajnia (1988) : A numerical model of wave deformation in surf zone, Coastal Engineering, ASCE, pp. 578-587.