

潜堤による平面2次元波の碎波変形の数値解析

川崎 浩 司*・岩田 好一朗**

1. はじめに

潜堤は、いうまでもなく、波浪制御をはじめとする海岸災害の防止などの海岸保全機能だけでなく、生態系との共生、海水交換による水質の浄化など優れた海域環境保全・創成機能を同時にもった海域構造物のひとつである。これまで、水理実験により、潜堤による平面2次元波の碎波変形について多くの研究(例えば、信岡ら, 1993; 岩田ら, 1996; 河合ら, 1996) がなされてきたが、その内部機構については現在もなお未解明の部分が多く、研究の余地が多く残されている。

本研究では、一定水深に設置された潜堤による平面2次元波の碎波変形の数値解析を、SOLA-VOF法(Nichols et al, 1980; Hirt and Nichols, 1981)を用いて行い、碎波と碎波後の波の再生過程の内部機構特性について水理実験結果と比較検討しながら考究する。

2. 数値解析手法

本計算手法で用いた基礎方程式は、式(1)～(5)に示すように、非圧縮粘性流体に対する、i) 連続方程式とii) 連続方程式を用いて保存形表示したNavier-Stokes運動方程式、iii) 自由水面の形状を決定するための、流体の体積率に相当するVOF関数 F の移流方程式の3つである。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial(wv)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 w \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(Fu)}{\partial x} + \frac{\partial(Fv)}{\partial y} + \frac{\partial(Fw)}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 x, y, z は直角座標軸であり、 x と y は水平軸でそれぞれ波進行方向、波進行直角方向を示し、 z は静水面上向きを正とする鉛直軸を表す。なお、原点は静水面と潜堤前面中央の延長線が交わる点とした。また、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の流速成分を、 p は圧力、 g は重力加速度、 ρ は流体密度、 ν は動粘性係数、 t は時間を表し、演算子 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ である。

上記した基礎方程式を用いて、潜堤による平面2次元波の碎波変形の数値解析をSOLA-VOF法により行った。なお、本計算手法では、Nichols et al.(1980)やHirt and Nichols (1981)が提案したオリジナルSOLA-VOF法の自由表面境界条件を修正することにより、より簡便に自由水面形状を計算することができる。本手法の詳細については、川崎・岩田(1996)が行ったものとほぼ同様であるが、潜堤表面に対してはslip条件と不透過条件を採用し、計算格子の大きさをより細かくしている。数値計算の諸条件として、解析領域を潜堤中心線に対して片側のみを考え、 x 方向に $4L_i$ 、 y 方向に $3L_i$ とし(L_i : 入射波長)、また、計算格子の大きさを、 x, y 方向に対しそれぞれ入射波長の0.025倍、 z 方向に静水深 h の0.1倍とした。時間間隔 Δt は、Courant安定条件を満足させ一定値になるように0.001sとした。

計算結果から、波高 H 、 x, y, z 方向に対する定常流 $\overline{\mathbf{V}} = (\overline{u}, \overline{v}, \overline{w})$ 、定常渦度 $\overline{\boldsymbol{\Omega}} = (\overline{w_x}, \overline{w_y}, \overline{w_z}) = \text{rot } \overline{\mathbf{V}}$ を求めた。また、0.02sごとに出力された水位変動データから、高速フーリエ変換を用いてスペクトル解析を行った。

3. 水理実験と解析方法

本数値計算の妥当性を検証するために、名古屋大学の平面波浪水槽(長さ28m、幅11m、深さ0.8m)を用いて水理実験を詳細に行った。静水深 h を40cmと一定に保った。作用波はすべて規則波であり、周期 T_i を0.8, 1.2, 1.68sの3種類を採用し、入射波高 H_i を $H_i/L_i = 0.026 \sim 0.087$ の範囲で変化させた。不透過性の矩形型潜堤の堤幅 B と堤高 D をそれぞれ $D/h = 0.6$ 、 $B/L_i = 0.3$ と固定し、堤長 W のみを $W/L_i = 0.5, 1.0, 1.5$ と変化させた。水位変動の計測を、波進行方向に対し潜堤前面から約 $2.0L_i$ 、潜堤の中心線から波進行直角方向に対し約 $1.6L_i$

* 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
** フェロー 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学教室

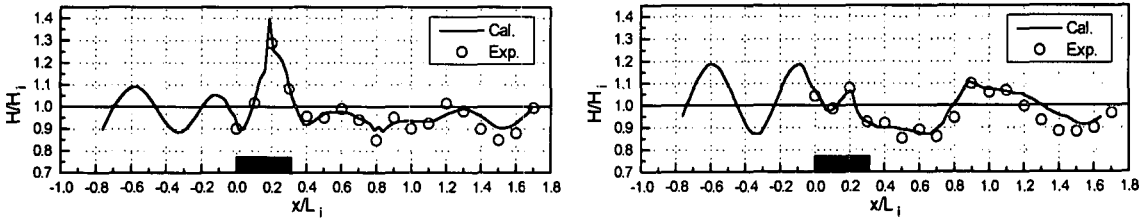
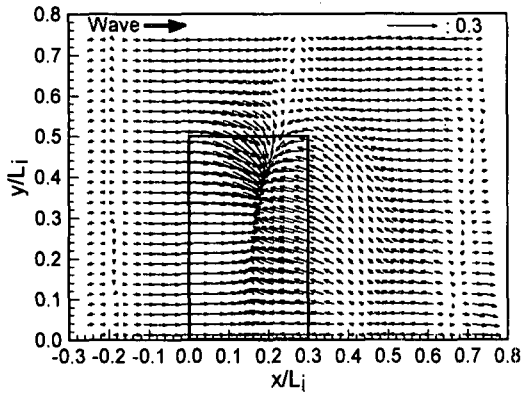
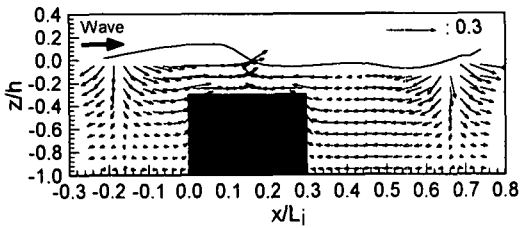
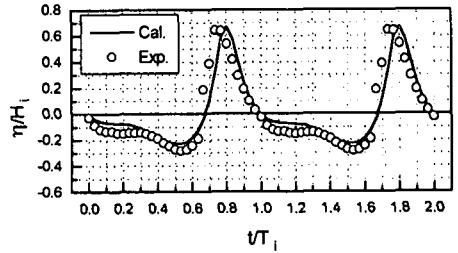
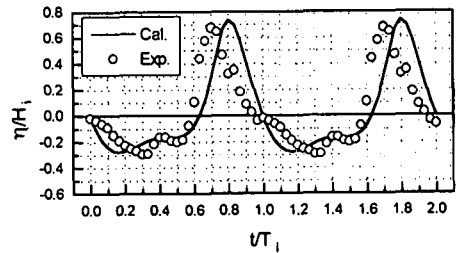
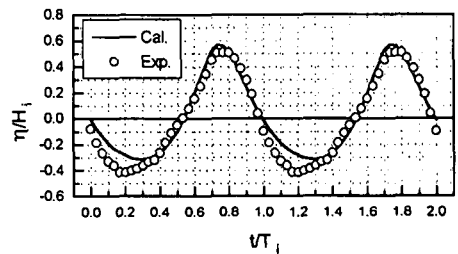
(a) 潜堤側方端部付近 ($y/L_i=0.3$)(b) 潜堤中心 ($y/L_i=0.0$)図-1 波高分布の計算結果と実験結果の比較 ($h/L_i=0.2$, $H_i/L_i=0.05$, $W/L_i=1.0$)(a) 水平断面 ($z/h=-0.15$)(b) 鉛直断面 ($y/L_i=0.0$)図-2 潜堤周辺の流速場 ($h/L_i=0.2$, $H_i/L_i=0.05$, $W/L_i=1.0$)(a) 潜堤上 ($x/L_i=0.3$, $y/L_i=0.0$)(b) 潜堤岸側背後 ($x/L_i=0.6$, $y/L_i=0.1$)(c) 波の再生領域 ($x/L_i=1.1$, $y/L_i=0.3$)

図-3 各地点での水位の時間波形

($h/L_i=0.2$, $H_i/L_i=0.05$, $W/L_i=1.0$)

の領域で、合計約 350 地点で電気容量式水位計 (計測技研: C-300, C-500) を用いて行った。また、流速の時間変動の計測を、水位変動の計測範囲とほぼ同範囲において約 120 地点、そして各地点での静水面から水深方向に 0.3hcm 間隔で設けた 3 地点、合計約 360 地点で電磁流速計 (ケネック: 本体部 VM-201 HA, 検出部 VMT 2-200-08 P) を用いて行った。

計測された水位変動と流速の時間波形を 0.04 s で離散化し、ゼロ点と各地点での位相のずれを補正した後、各地点での波高 H 、定常流 $\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{w}$ を求めた。

4. 潜堤周辺における水面変動特性

潜堤周辺における波高分布の計算値と実験値を比較した結果を図-1 に例示する。なお、この場合の砕波形式は

Spilling 型砕波と Plunging 型砕波の中間型 (S-P 型砕波) である。図-1(a) は、潜堤側方端部付近の x 軸に平行する測線 $y/L_i=0.3$ での波高分布を示しており、波と潜堤による非線形干渉の影響から、潜堤上で計算値および実験値ともに急激に波高が増大し、入射波高の約 1.4 倍になっていることがわかる。潜堤前面では入射波と潜堤からの反射波の相互干渉より約 $L_i/4$ 間隔ごとに腹と節が交互に現れる部分重複波の形成が認められる。一方、潜堤岸側背後では、砕波の影響により波高が計算値と実

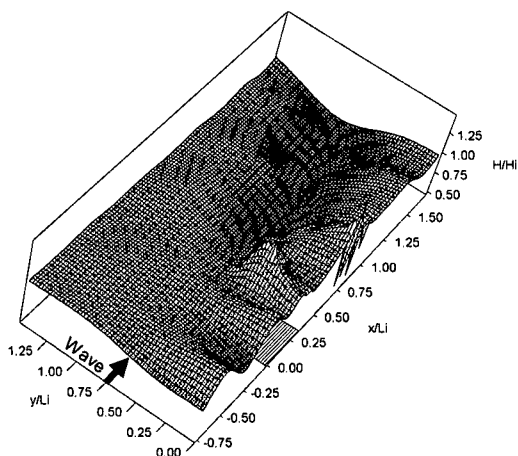
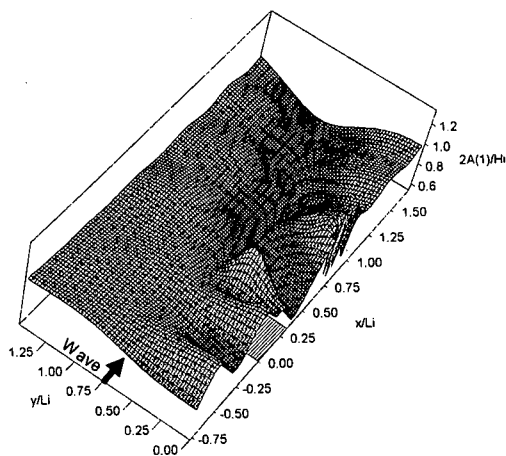
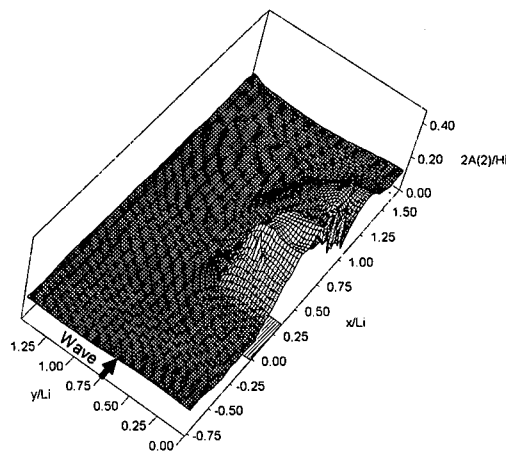


図-4 計算結果による潜堤周辺の波高分布
($h/L_i=0.2$, $H_i/L_i=0.05$, $W/L_i=1.0$)



(a) 基本周波数成分



(b) 2倍周波数成分

図-5 計算結果による潜堤周辺のスペクトル分布
($h/L_i=0.2$, $H_i/L_i=0.05$, $W/L_i=1.0$)

験値とともに低減している。図-1(b)に示す潜堤中心の測線 $y/L_i=0.0$ では、図-1(a)に示す傾向と同様、潜堤前面において部分重複波の形成が確認できるものの、潜堤上での波高は、図-1(a)に示す潜堤上の波高に比べて波高の増大がみられない。このことから、潜堤側方端部付近において、潜堤上で急変する水深の影響による波の局所的な屈折効果から波高が増大するものと考えられる。

図-2は、長波の波速 $\sqrt{gh}$ で無次元化された流速を示す。同図は、潜堤上で最も波高が大きくなる時の潜堤周辺の流速場を示すが、水深急変による影響から一般的に潜堤上での波速は遅くなるため、図-2(a)からわかるように、流速の向きが潜堤端部側方から潜堤中心に向かっており、また、図-2(b)より、 $0.15 < x/L_i < 0.65$ では波谷のため、流速ベクトルは潜堤岸側背後から潜堤に向かっており、この流れと潜堤端部側方から潜堤中心に向かう流れが潜堤端部付近で衝突することにより、自由水面の波形が急峻化し碎波すると推察される。

紙面の制約上図示できないが、 W/L_i が小さい場合、潜堤中心で最も大きな波高をもつことが認められ、岩田ら(1996)も指摘しているように、 W/L_i が大きくなるにつれて、碎波位置が潜堤中心から潜堤端部に移動し、潜堤端部付近で最も波高が増大するといえる。

ついで、潜堤周辺における各地点での水位の時間変動の一例を図-3に示すが、波と潜堤による非線形干渉により潜堤上から潜堤岸側背後において波峰が急峻化し、波谷が平坦になっていることがわかる。また、潜堤岸側背後(図-3(b))において、波谷の位置で計算値と実験値より高次の周波数成分波の発生が認められるが、図-3(c)に示す波の再生領域では顕著にみられない。

図-1, 3から、本計算手法で用いた SOLA-VOF 法による計算結果は実験結果を精度よく再現しており、その

妥当性および有効性が検証される。

つぎに、碎波に伴う潜堤周辺での波高分布の計算結果を図示した図-4をみると、前述したように、水深急変部において波と潜堤の非線形干渉が強まり、特に潜堤端部付近で波の屈折や潜堤による散乱波の影響から、より波高が増大することがわかる。また、この場合の碎波形式は S-P 型碎波であり碎波規模がそれほど大きくないため、潜堤岸側背後での波高減衰は明瞭に認められない。ついで、潜堤周辺における各周波数成分波の特性を明らかにするために、無次元波高スペクトル $2A(f)/H_i$ ($A(f)$: 振幅スペクトル, f : 周波数)の空間分布を図-5に示す。ここで、(a)と(b)はそれぞれ基本、2倍周波数成分の場合を表す。潜堤岸側背後の領域において、波と潜堤の非線形干渉の影響から、基本周波数成分のスペクトル値が低減する一方、この領域において2倍周波数

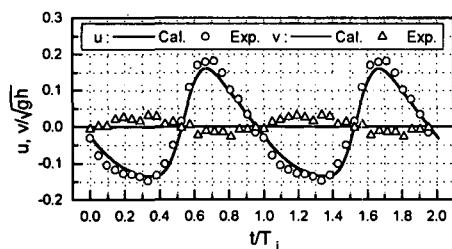
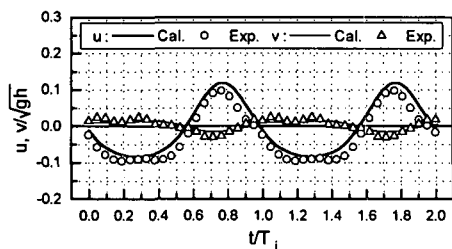
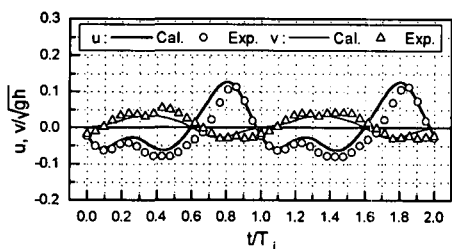
(a) 潜堤上 ($x/L_i=0.1$, $y/L_i=0.0$)(b) 潜堤端部側方 ($x/L_i=0.3$, $y/L_i=0.6$)(c) 波の再生領域 ($x/L_i=0.5$, $y/L_i=0.4$)

図-6 各地点での流速の時間波形

(h/L_i=0.13, H_i/L_i=0.029, W/L_i=1.0; z/h=-0.3)

成分が急激に増大しているのがわかる。

また、図-4 に示す同条件下での潜堤周辺の波高分布をみると、基本周波数成分が減少している領域 ($0.25 < x/L_i < 0.75$ かつ $0.0 < y/L_i < 0.6$) において、波高の減衰は顕著に認められない。以上のことから、基本周波数成分の波エネルギーが2倍周波数成分を含む高次周波数成分へと cascade down していると判断できる。しかし、波の再生領域 ($x/L_i > 0.8$) では、基本周波数成分のスペクトル値は再び増大し、2倍周波数成分は規則的に変動し減衰している様子が認められ、水理実験より水位変動のスペクトル解析を行った岩田ら (1996) が述べているように、本数値計算の結果からも2倍周波数成分の自由波が発生している可能性が高いと考えられる。図示していないが、2倍周波数成分より高次の周波数成分の特性については、潜堤上で急激にスペクトル値が増大するものの、潜堤岸側背後では、2倍周波数成分の傾向と異なり、スペクトル値は規則的に変動しないで徐々に減少する。

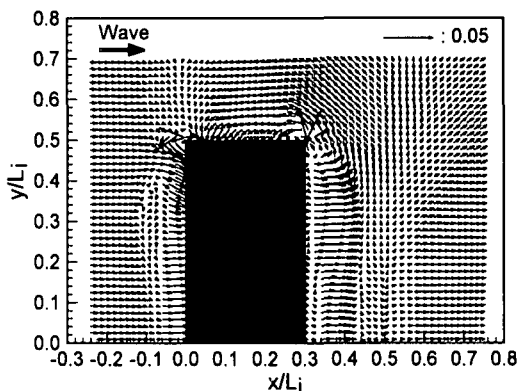
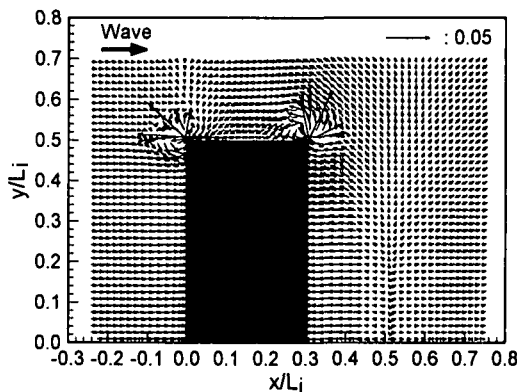
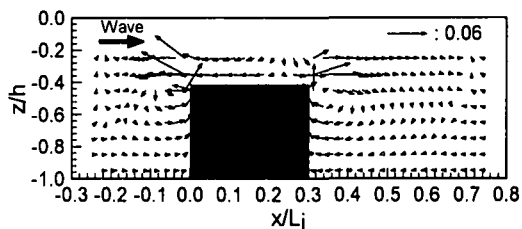
(a) 水平断面 ($z/h=-0.4$)(b) 水平断面 ($z/h=-0.95$)(c) 鉛直断面 ($y/L_i=0.15$)

図-7 潜堤周辺の定常流

(h/L_i=0.13, H_i/L_i=0.029, W/L_i=1.0)

5. 碎波に伴う潜堤周辺の流速場

図-6 は、潜堤周辺における各地点での流速の時間波形の計算値と実験値を同時に図示したものである。計算値は、水位変動と同様、潜堤周辺および波の再生領域においてよく実験値と一致しており、本計算手法の妥当性が検証される。

図-7 に、 $\sqrt{gh}$ により無次元化された定常流を示すが、潜堤背後では岸向き流れが、潜堤から離れた側方では碎波により生じる岸向きへの質量輸送を補う補償流として

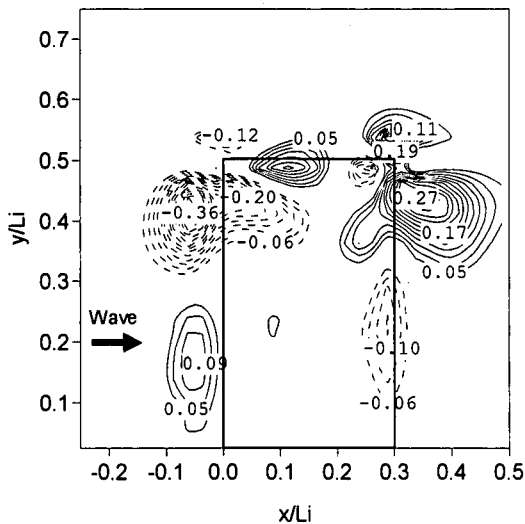
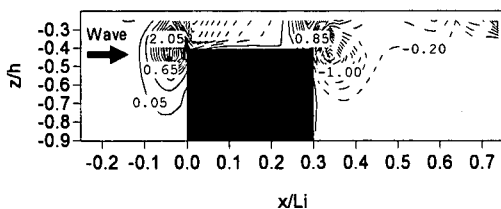

 (a) 水平断面 ($z/h = -0.25$)

 (b) 鉛直断面 ($y/h = 0.15$)

 図-8 潜堤周辺の定常渦度分布
 ($h/L_i = 0.2$, $H_i/L_i = 0.05$, $W/L_i = 1.0$)

沖向き流れが発生する。さらに、潜堤中央付近 ($y/L_i = 0.15$) での定常流速場を示した図-7(c) より、潜堤岸側背後において、自由水面付近で強い岸向き流れ、中層部と底層付近では沖向き流れがみられ、潜堤周辺で水平 2 次元および鉛直 2 次元の循環流が同時に形成されると判断できる。また、 $z/h = -0.95$ の底層付近(図-7(b))では戻り流れが卓越することが確認でき、佐々木ら(1990)が述べているように、浮遊砂を潜堤側方を通して沖に流出させる主な原因となっていることが検証できる。さらに、潜堤隅角部では強い渦が発生しており、この周辺で底面が洗掘されやすいと考えられる。

図-8(a)は、 $z/h = -0.3$ の位置での、 z 軸まわりの定常渦度 $\overline{w_x}$ を示したもので、大きな渦は潜堤隅角部近辺で認められ、反時計まわりと時計まわりの 2 つの渦が対に形成されていることが認められる。また、潜堤周辺の渦度分布 $\overline{w_y}$ を示す図-8(b) から、潜堤隅角部周辺で

強い渦の発生が確認でき、さらに潜堤岸側背後では碎波の影響により自由水面でのみ広範囲にわたって大きな渦度をもつことがわかるが、この場合潜堤岸側背後において碎波の影響が水深方向にあまり伝達していない。

6. おわりに

本研究では、一定水深における潜堤による平面 2 次元波の碎波変形の数値解析を SOLA-VOF 法により行い、碎波に伴う潜堤周辺の水位変動特性および内部機構について考究してきた。計算結果より、2 倍周波数成分は、波の再生領域で規則的に変動しており、潜堤と波の非線形干渉および碎波の影響のため、新たに高次の自由波が形成された可能性が高いこと、無次元堤長 W/L_i が大きくなるにつれて、碎波位置が潜堤中心から潜堤端部に移動し、潜堤端部の隅角部付近で最も波高が大きくなること、碎波の影響により潜堤周辺において、鉛直 2 次元の循環流と水平 2 次元の循環流が同時に発生する定常流が生じることなどの知見が得られた。また、本計算手法で用いた SOLA-VOF 法から得られた計算結果は、水理実験で得られた碎波変形と再生過程における水面波形や水粒子速度を精度良く再現することが確認できた。

今後引き続き、3 次元波動場に置かれた潜堤による碎波再生過程の内部構造を詳細に議論していく所存である。

参考文献

- 岩田好一朗・川崎浩司・亀崎大輔 (1996): 碎波に伴う潜堤周辺の波・水粒子速度場の細部構造に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 56-60.
- 河合弘泰・工藤 巧・榎本達也・上原 功・平石哲也 (1996): 潜堤周辺の波・流れ場と砂移動に関する平面実験, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 651-655.
- 川崎浩司・岩田好一朗 (1996): 3 次元波動場に設置された潜堤による Spilling 型碎波の変形過程に関する数値解析, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 96-100.
- 佐々木幹夫, 首藤 啓, 竹下 彰 (1990): 潜堤周辺の海浜流・海浜変形数値計算法の検討, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 404-408.
- 信岡尚道・村上啓介・入江 功・松永厚彦・木原康成・牛房幸光 (1993): 潜堤構造物の海浜流制御と海岸保全機能, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 261-265.
- Hirt, C. W., and B. D. Nichols (1981): Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, J. Comp. Phys., Vol. 39, pp. 201-225.
- Nichols, B. D., C. W. Hirt, and R. S. Hotchkiss (1980): SOLA-VOF - A solution algorithm for transient fluid with multiple free boundaries, Report LA-8355, Los Alamos Scientific Laboratory, University of California.