

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

川崎 浩 司*・岩田 好一朗**

1. 緒 言

最近、海岸・海洋構造物に対して、波を利用しつつ制御する“波の利用制御”機能、海域環境との調和機能など多くの機能が要求されるようになってきた。潜堤は、海域の防災のみならず、景観面、水質の浄化、水産生物の増殖といった海域環境の創造に対しても貢献度が高い波浪制御構造物のひとつである。また、潜堤は、強制碎波により波のエネルギーの低減をもたらすだけでなく、潜堤背後への波の伝達も許すため、碎波変形過程と碎波後の波の特性を熟知することがよりよい海域環境の創生のためにも大変重要である。これまで、3次元波動場に置かれた潜堤による碎波変形について水理実験や現地観測により議論されているが（信岡ら、1993；中野ら、1994；青野ら、1995）、その内部機構については十分に解明されていない。さらに、最近、強非線形な現象である碎波の内部機構を数値解析により把握しようとする試みがなされているが、3次元波動場を取り扱った研究はあまり前例がない（朴・宮田、1994a, 1994b）。

本研究では、強非線形な現象に適用可能な SOLA-VOF 法（Hirt and Nichols, 1981）を用いて、3次元波動場に設置された潜堤による碎波、特に Spilling 型碎波に対して数値解析を行い、碎波を伴う潜堤周辺の波変形およびその内部機構について考究し、本計算手法の妥当性を水理実験により検証することを目的とする。

2. 数 値 解 析

本計算手法で用いた基礎方程式は、非圧縮性粘性流体に対する、(i) 連続方程式（式（1））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（式（2）～（4））、(iii) 自由表面の形状を模擬するための、流体が占める体積率に相当する関数（VOF 関数）の移流方程式（式（5））の3つから構成される。

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} \\ = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

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

ここで、 x, y, z は直角座標軸であり、 x と y は水平軸、 z は静水面を原点とし上向きを正とする鉛直軸である。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 は時間を表す。

本論では、上述の基礎方程式を、計算格子の中央に圧力 p 、VOF 関数 F を、計算格子の表面上に流速 u, v, w を置く staggered mesh（図-1 参照）を用いて、差分近似して数値計算を行う。なお、図中の下付き記号 (i, j, k) などはそれぞれの物理量の位置を表す。また、 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ は各方向の計算格子の長さであり、本計算では、 $\Delta x/L_i = \Delta y/L_i = 0.05$ 、 $\Delta z/h = 0.1$ とした (L_i : 入射波長、 h : 静水深)。

本計算手法のフローチャートについて説明すると、図-2 に示すとおり、まずはじめに、静水位、波の入射条件、潜堤の幾何スケール等の初期条件を入力する。そして、流速の境界条件を満足するよう Navier-Stokes 方程式（式（2）～（4））を解き、次の時間ステップの流速を計算する。しかし、このとき、運動方程式から得られた流速の値は、必ずしも連続方程式（式（1））を満足していないため、流速と圧力を調整しながら連続方程式を満たすまで繰り返し計算を行う必要がある。ついで、連続方程式を満足した流速の値を用いて、VOF 関数 F の移流方程式を計算し自由表面を模擬する。ここで、自由表面

* 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 名古屋大学教授 工学研究科土木工学教室

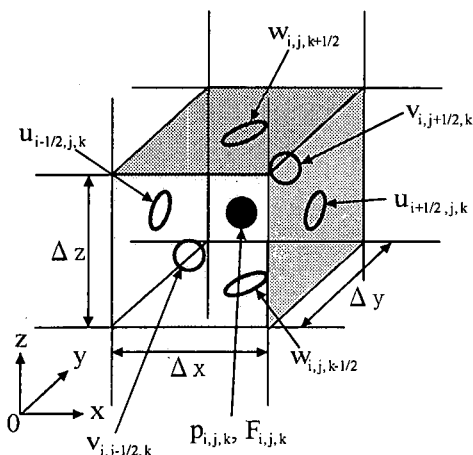


図-1 staggered mesh の定義図

の形状を決定する際に、表面セル（流体と気体が混在するセル）において自由表面の向きとその高さを決定しなければならない。以上述べた計算の流れを各時間ステップ（本計算では、時間ステップ間隔 $\Delta t = 0.01\text{s}$ とした）で繰り返すことにより時間発展計算することができる。なお、数値計算手法の詳細は、岩田ら（1995）とほぼ同様である。

図-3に示すように、一定水深における3次元波動場に設置された潜堤による碎波変形の数値解析を行った。ここで、 B 、 W 、 D はそれぞれ潜堤の堤幅、堤長、堤高を、 h 、 R は静水深、潜堤上の天端水深を表す。原点は静水面と潜堤前面中央の延長線が交わる点、 x 軸と y 軸はそれぞれ波進行方向とその直角方向である。解析領域は、水理実験で潜堤中心線に対しほぼ対称な碎波現象が認められたこと、計算時間の短縮を考慮して、潜堤中心線に対して片側（図中の網掛け部分、本計算では x 、 y 方向にそれぞれ $4L_i$ 、 $3L_i$ の範囲）のみとし、対称条件としてslip条件を $y=0$ の線上に課した。

自由表面および潜堤中心線以外の境界条件は、潜堤表面に対して不透透およびnon-slip条件を、岸側境界に対してSommerfeld放射条件を適用し、沖側境界として造波境界条件を課し、Stokes波の第3次近似理論に基づく流速値を与えた。また、側方境界を、潜堤による回折波の影響があまりないと思われる位置に設置し、各方向の流速勾配が0となる開境界条件を適用した。しかしながら、本計算手法で用いた境界条件処理は、境界面からの反射波の発生が予想されるため、現在、無反射境界処理を考慮した3次元数値波動水槽の開発について検討中である。

3. 水理模型実験と解析方法

水理模型実験を、名古屋大学の平面波浪水槽（長さ28

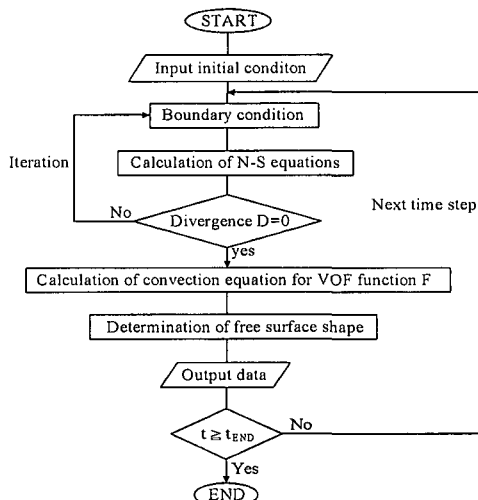


図-2 本計算手法のフローチャート

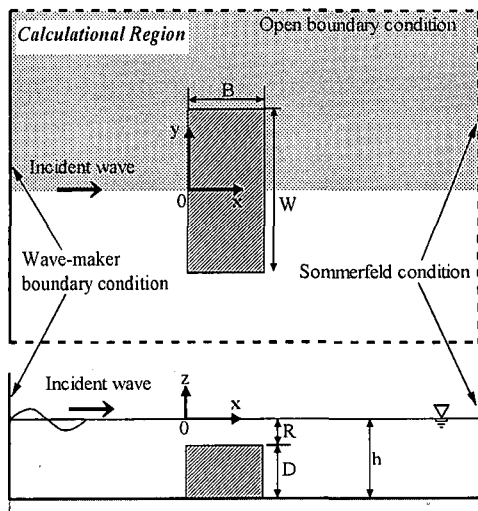


図-3 潜堤と数値水槽の諸元

m、幅11m、深さ0.8m）を用いて行った。実験では、静水深 h を40cmと一定に保ち、潜堤前面に対し直角入射する規則波を作用させ、周期 T を0.8、1.2、1.68sの3種類、入射波高 H_i を碎波形式がSpilling型碎波になるように、 $H_i/L_i = 0.026 \sim 0.087$ の範囲で変化させた。潜堤の堤幅 B と堤高 D はそれぞれ $B/L_i = 0.3$ 、 $D/h = 0.6$ の1種類、堤長 W は $W/L_i = 0.5$ 、1.0、1.5の3種類である。それぞれの実験ケースに対して、潜堤前面から波進行方向に約 $1.8L_i$ 、潜堤の中心線から波進行直角方向に約 $1.4L_i$ の範囲で、潜堤周辺の水位および流速変動の計測を電気容量式水位計と電磁流速計を用いて行った。水位変動の計測点は、 x と y 方向に $0.1L_i$ 間隔で合計約240地点、流速に関しては、水深方向に-12、-24、-36cmの

3地点を含む約100測線、合計約300地点である。

計測された水位と流速の時間変動から、波高 H 、平均水位 $\bar{\eta}$ 、 x 、 y 方向の定常流 $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ を求めた。また、式(6)を使って渦度 ω_z を計算した。

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \dots \dots \dots (6)$$

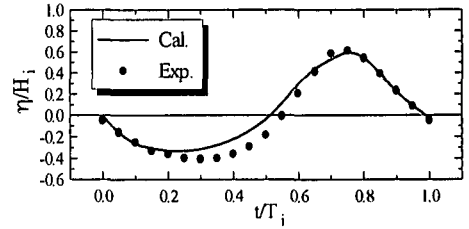
4. 計算結果と考察

4.1 砕波を伴う潜堤周辺の波変形特性

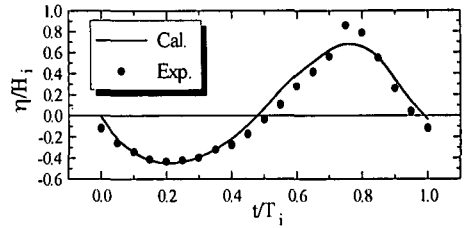
まず、本計算手法の妥当性を検討するために、潜堤周辺での水面の時間波形および波高分布について実験結果と比較する。図-4、5は、それぞれ $W/L_i=0.5$ 、 1.0 と異なる場合の潜堤上と潜堤背後での水面の時間波形を示したもので、計算結果は実験結果とよく一致しているのがわかる。また、この場合の砕波形式は非常に弱いSpilling型砕波であり、水面波形は波峰が尖っているものの正弦波に近い。図-6に、図-4、5と同条件で計算を行った、潜堤周辺での波高の鳥瞰図を示す。同図より、潜堤上の急変する水深の影響から波が屈折するため、特に堤長が長い場合、潜堤側方端部付近で急激に波高が増大している。また、潜堤前面では、部分重複波の形成、周辺では潜堤から生じる回折波が認められる。図-7に潜堤周辺の等波高線図を例示するように、計算結果と実験結果の対応性は悪くない。また、潜堤背後領域で、砕波による波高減衰があまり認められず、潜堤と波の非線形干渉の影響により波高が入射波高より大きくなっている。

4.2 潜堤周辺の流速場特性

図-8、9は、潜堤周辺の定常流速場を示したもので、それぞれ計算および実験結果である。なお、定常流速は $\sqrt{gh}$ によって無次元表示している。両図より、潜堤背後では岸向き流れが、潜堤から離れた側方では砕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沖向き流れが卓越しており、潜堤周辺で平面2次元な循環流が生じていると推察できる。 $z/h=-0.9$ の底層付近では、流れが沖向きに卓越しており、佐々木ら(1990)が報告しているように、この沖向き流れが浮遊砂を潜堤側方を通して沖に流出させる主な原因といえる。図-8と図-9を比較すると、計算結果は、実験結果を過小評価しているものの、水理実験では閉じた平面水槽を使用して造波させており、水槽内の循環流として沖向き流れが生じている可能性があるため、このことを考慮すると、本計算手法は水理実験をほぼ再現していると考えられる。しかし、水理実験で観測された図-9(a)の $x/L_i=1.0$ 付近の強い岸向き流れは計算結果から確認できない。このことは、砕波後の現象に対するモデリングの必要性を示唆しているものと考えられ、今後の課題といえる。つぎに、潜堤中央($y/L_i=0$)での定常流速場を示した図-8をみ

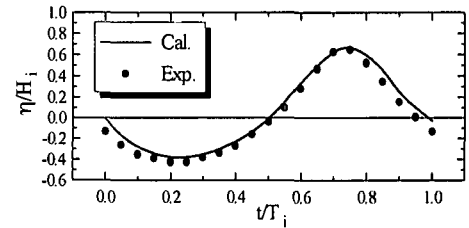


(a) $x/L_i=0.0$, $y/L_i=0.0$ (潜堤上)

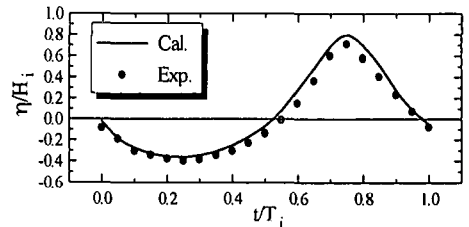


(b) $x/L_i=6.0$, $y/L_i=0.0$ (潜堤背後)

図-4 水面の時間波形 ($h/L_i=0.4$, $H_i/L_i=0.077$, $W/L_i=0.5$)



(a) $x/L_i=0.3$, $y/L_i=0.5$ (潜堤上)



(b) $x/L_i=0.4$, $y/L_i=0.5$ (潜堤背後)

図-5 水面の時間波形 ($h/L_i=0.4$, $H_i/L_i=0.077$, $W/L_i=1.0$)

ると、潜堤背後(岸側)において、自由表面では強い岸向き流れ、中層および底層付近では沖向き流れとなる鉛直2次元な循環流が認められる。図-10は、 $z/h=-0.3$ の位置での、潜堤周辺の定常流の渦度 $\bar{\omega}_z$ を示したもので、 $\bar{\omega}_z$ は定常流速の値を用いて式(6)により計算した。同図をみると、大きな渦は潜堤近辺で認められ、隅角部付近では反時計回りと時計回りの2つの渦が形成されている。また、図示していないが実験結果との比較も悪くなかった。

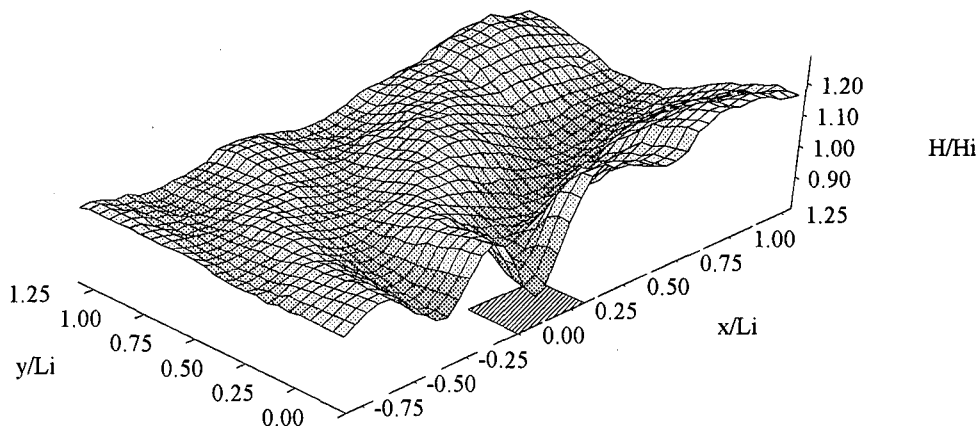
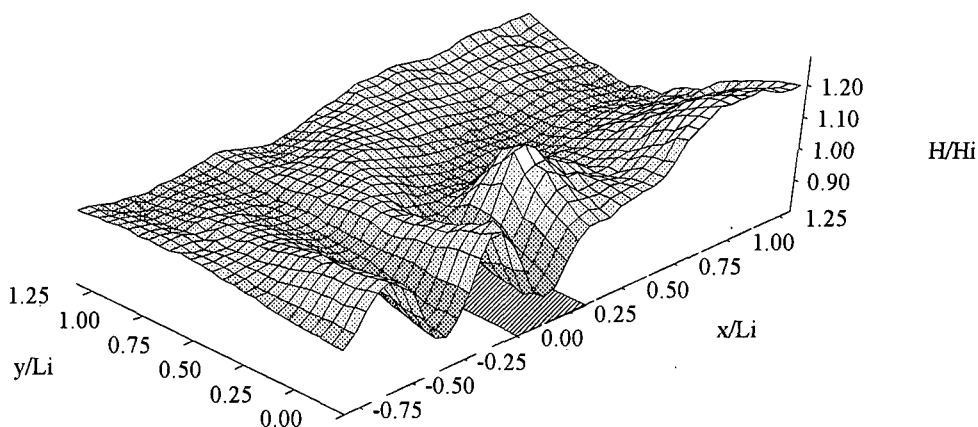
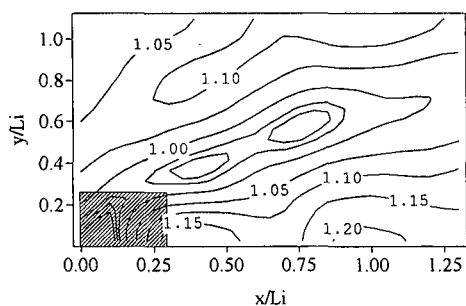
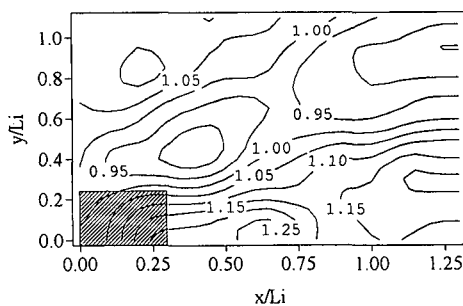
(a) $h/L_i=0.4$, $H_i/L_i=0.077$, $W/L_i=0.5$ (b) $h/L_i=0.4$, $H_i/L_i=0.077$, $W/L_i=1.0$

図-6 潜堤周辺の波高分布 (計算結果)



(a) 計算結果



(b) 実験結果

図-7 潜堤周辺の波高分布の比較 ($h/L_i=0.4$, $H_i/L_i=0.077$, $W/L_i=0.5$)

5. 結 言

本研究では、3次元波動場に設置された潜堤によるSpilling型碎波の波変形とその内部機構について数値解析を行い考究してきた。本計算手法の結果と水理実験の対応性は悪くなく、計算結果から、堤長が長い場合、潜

堤側方端部で波高が特に増大すること、潜堤周辺において2つの循環流が発生することなど興味ある知見が得られた。今後、無反射境界処理を考慮したより精度の高い3次元数値計算手法の開発および特にPlunging型碎波による減衰項のモデル化を行い、碎波後の再生波を含んだ碎波変形の数値予測手法について検討していく所存で

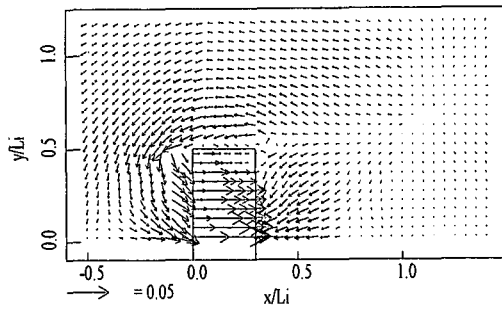
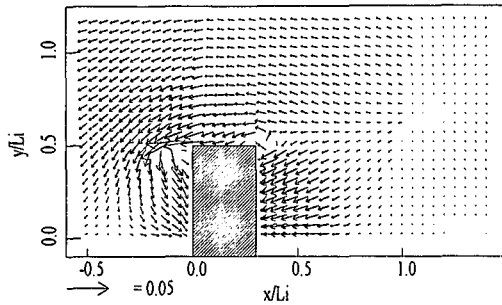
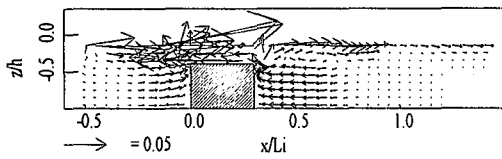
(a) $z/h = -0.3$ (b) $z/h = -0.9$ (c) $y/L_i = 0$

図-8 潜堤周辺における定常流 (計算結果)
($h/L_i=0.2$, $H_i/L_i=0.055$, $W/L_i=1.0$)

ある。

参 考 文 献

- 宵野利夫・Eric. C. Cruz・大中 晋・後藤智明 (1995): 人工リーフ上の波と流れの現地観測, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 761-765.
- 岩田好一朗・川崎浩司・金 度三 (1995): 水中構造物による碎波の数値解析, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 781-785.
- 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.
- 中野 晋・三島豊秋・中野孝二・三井 宏 (1994): サーフィンに適するデルタ型リーフ周辺の波浪特性, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 721-725.
- 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

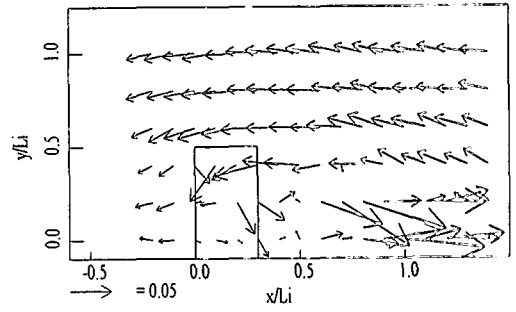
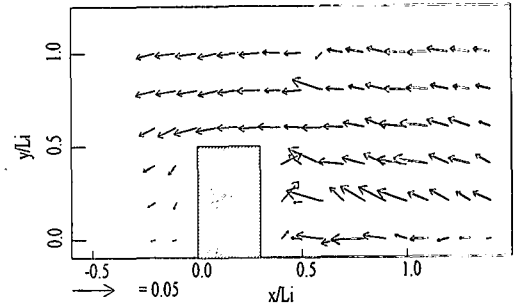
(a) $z/h = -0.3$ (b) $z/h = -0.9$

図-9 潜堤周辺における定常流 (実験結果)
($h/L_i=0.2$, $H_i/L_i=0.055$, $W/L_i=1.0$)

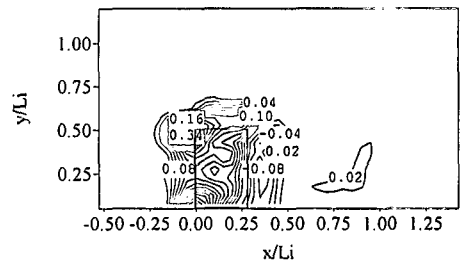


図-10 潜堤周辺における定常流の z 成分渦度 (計算結果)
($h/L_i=0.2$, $H_i/L_i=0.055$, $W/L_i=1.0$; $z/h=-0.3$)

論文集, 第40巻, pp. 261-265.

- 朴 鍾千・宮田秀明 (1994a): 有限差分法による2次元および3次元波崩れの数値シミュレーション, 日本造船学会論文集, 第175号, pp. 11-24.
- 朴 鍾千・宮田秀明 (1994b): 大波中の海洋構造物まわりの波崩れを含んだ三次元非線形波動のシミュレーション, 日本造船学会論文集, 第176号, pp. 31-42.
- Hirt, C. W. and B. D. Nichols (1981): Volume of Fluid (VOF) method for the Dynamics of Free Boundaries, Jour. of Comp. Phys., Vol. 39, pp. 201-225.