

種々の形式の透過性構造物周辺における 表面波及び内部波の非線形数値計算

A NONLINEAR NUMERICAL MODEL OF SURFACE AND INTERNAL WAVES AROUND VARIOUS PERMEABLE BREAKWATERS

柿沼太郎

Taro KAKINUMA

正会員 博(工) 独立行政法人港湾空港技術研究所 海洋・水工部
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目 1-1)

The effect of different types of coastal structure on surface and internal waves has been studied considering the nonlinear properties of the fluid motion. The governing equations are a set of nonlinear equations for a multilayer fluid system in a permeable medium. In the derivation process, the Lagrangian of each fluid layer was integrated vertically satisfying the nonlinear boundary conditions on the interfaces. Then the variational principle was applied to yield a set of fully nonlinear equations taking a continuous distribution of porosity into account. The structures are described as porous bodies. Using this model, several numerical computations were carried out for the surface/internal long waves around transmissive permeable breakwaters including submerged breakwaters, breakwaters with a watercourse and submerged horizontal plates. The deformation of surface/internal waves around different breakwaters has been compared with one another. The water particle trajectories have been also simulated.

Key Words: *Internal wave, porosity, permeable breakwater, breakwater with a watercourse, submerged breakwater, submerged horizontal plate*

1. 序 論

波浪制御構造物を設置する際には、海域環境を鑑み、港湾内の水質を良好に保ち、改善するための方策が要請される。例えば、安全面のみを考慮して水域を防波堤で囲ってしまうと、閉鎖性を強め、水質悪化の問題を引き起こす可能性があるからである。海水循環の阻害要因をできるだけ除外し、更に、港内の海水交換を促進するような防波堤の平面配置を工夫する必要がある。

近年、こうした水環境の保全・改善の観点からも、構造物それ自体が海水交換をなるべく妨げない形式、すなわち、透過性構造物の技術開発が進められている。透過性構造物には、通路を有する不透水性堤防、空隙等を有する透水性堤防、前後壁に穴やスリットを配したケーソン堤、潜堤、そして、没水平板や浮体構造物等がある。更に、より積極的に湾内の海水交流を進めるため、波浪エネルギーを流れに変換することによって導水の向きを制御しようとする構造物も考えられており、遊水室内部に鉛直板を設けたスリットケーソン¹⁾や、多翼式防波堤²⁾等がそれである。

こうした透過性構造物による表面波並びに流れの制御に関して、水理実験と数値計算の両者によって研究

が進められている。そして、防波堤建設の検討に際し、湾内における海水交換への影響評価がなされ、実際に施工され利用されている構造物もある。数値計算手法の一例を挙げれば、潜堤上の碎波の解析として、滝川³⁾や川崎・岩田⁴⁾がある。また、種々の潜水構造物に対して、織田⁵⁾が Green 関数を用いる境界積分方程式を基礎式として plunging point 直前までの碎波を比較し、Gao⁶⁾が σ 座標を用いて碎波・乱流共存場の解析を行なっている。また、空隙率を有する透水性潜堤上の非線形波に対しては、榊山⁷⁾、松見⁸⁾及び水谷⁹⁾のモデルがある。そして、浮体構造物に対しては、薄板状の浮体構造物への表面波の入射を劉・堺¹⁰⁾が、薄板状の浮体/没水構造物と表面波・内部波の相互干渉を柿沼¹¹⁾が解析している。こうした様々な数値解析法が提案され、成果をあげている。

ところで、水域の環境を考えると、密度成層が重要な役割を果たす場合がある。水温や塩分濃度が、密度の違いとして物理現象に現れ、成層水域では、流体運動が単一密度の場合と異なる。そのため、構造物が受ける応力も 1 層問題と異なるであろう。そして、波や流れによって、密度の変化が周辺領域へと伝播するから、人工物が水圏環境に与える影響は、十分に広範

困の領域を対象として定量的に評価されねばならない。しかし、成層化された領域の波・流れ場に対する構造物の影響については、単一密度場に対するほど研究が進んでいないのが現状である。そこで、本研究では、成層化した水域に種々の形態の透過性構造物を設置したときの、表面波及び内部波の変形や水粒子の運動について、流体運動の非線形性を考慮して考察する。例えば、冬期に低温となった比重の大きな海水が夏期に底部に停滞するために、また、淡水が河川から流入して湾内に塩分差が生じるために、海中に内部界面が発生するが、このとき、内部潮汐といった内部波の侵入によってどのような波・流れ場が発生するか調べる。

ここでは、上・下2層に成層化された水域に各種の透過性構造物を設置した際の数値シミュレーションを行なう。適用するモデルは、柿沼¹²⁾による透水層の空隙率を考慮した表面波・内部波の非線形数値解析法である。これは、図-1に示す多層流体に対する multilayer model であり、支配方程式は、流体の各層において Lagrangian を鉛直方向に解析的に積分してから、変分原理を適用して導出した、平面2次元形の完全非線形方程式系である。本研究では、構造物を港口等の比較的浅い水域に設置することを想定して、表面長波及び内部長波を対象とするが、それぞれの波の非線形性を考慮する。

本研究で提案するモデルの特徴の一つは、構造物をすべて、空隙率を有する多孔質媒体から構成されている物体として表現することである。すなわち、空隙率を ε とすると、 $\varepsilon \ll 1$ である位置に、ほとんど透水を許さない物体が存在し、 ε が大きいほど、そこにある構造物の透水性が大きい。そして、 $\varepsilon = 1$ の点には、構造物が存在しない。このように空隙率の空間分布を連続的に設定しておくことにより、一つの鉛直積分型モデルによって、3次元的に任意形状を有する構造物、例えば、いくつかの堤防や潜堤、没水平板等が存在する水域を水底や透水層下面から水面まで統一的に扱える。

ここでとりあげる構造物は、図-2~4のような3種類の構造物である。図-2(a)の Structure A-0 は、空隙率を有する防波堤であり、表面波・内部波共存場に設置されている。A-1, A-2 は、堤体高の異なる潜堤である。図-3の B-1, B-2 は、空隙率が1である部分を有しており、これが通水路として機能する。また、図-4の C-1, C-2 は、没水平板である。上層と下層のそれぞれの内部に没水平板を挿入する。これらの条件の違いが2層問題における波・流れ場にどのような影響を及ぼすのか調べる。なお、スロープ型の通水路には、表面波の遮断効果を大きくし、かつ、表面波による海水の循環性を阻害しない利点があり¹³⁾、また、前後に傾斜した没水平板も、様々な特徴を有する¹⁴⁾。内部波が存在する場合に対するこれらの構造物の有効性について検討が必要であるが、ここでは、基本形として水平型の通水路や没水平板を対象とする。

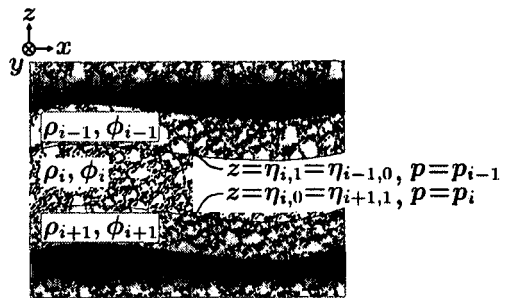


図-1 透水層内の多層流体

2. 透水層内の流体運動を考慮した表面波及び内部波解析のための非線形方程式系

図-1のように、密度の異なる互いに混合しない非粘性・非圧縮性流体が成層状態にあるとする。流体の種類を上から順に $i = 1, 2, \dots, I$ で表わし、各流体の密度及び乱されない状態における層厚をそれぞれ $\rho_i = \text{const.}$ 及び $h_i(x)$ ($\sum_{i=1}^I h_i = h(x)$) とする。

第 i 層の各点における実流速 (seepage velocity) の水平方向成分ベクトル及び鉛直方向成分をそれぞれ u_i 及び w_i で表わす。実流速場において流体運動が非回転であると仮定すると、実流速に対して、 $u_i = \nabla \phi_i$ 、 $w_i = \partial \phi_i / \partial z$ で定義される速度ポテンシャル $\phi_i(x, z, t)$ が存在する。ここで $\nabla = (\partial / \partial x, \partial / \partial y)$ は、水平方向の微分演算子である。

第 i 層の下面及び上面の位置をそれぞれ $z = \eta_{i,0}$ 及び $z = \eta_{i,1}$ とし、下面における圧力を $p_i(x, t)$ と定義する。 $\eta_{i,j}$ ($j = 0, 1$) は、 x の1価関数であると仮定し、境界面で摩擦が働かないとする。また、表面張力による効果を重力の効果に比べて無視する。このとき、透水層の空隙率 ε を導入して、透水層内の流体運動を考慮した表面波及び内部波解析のための完全非線形方程式系が得られる¹²⁾。ここでは、極浅水域を対象とし、次式のような非線形長波方程式とする。

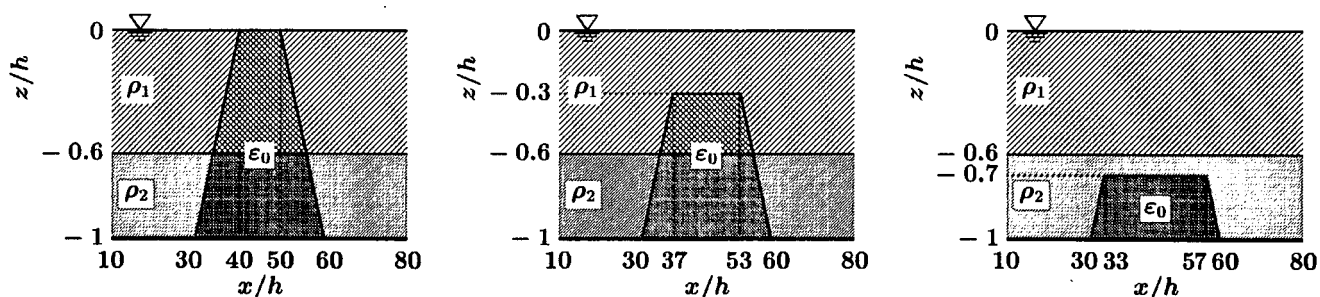
$$\varepsilon^{\eta_{i,1}} \frac{\partial \eta_{i,1}}{\partial t} - \varepsilon^{\eta_{i,0}} \frac{\partial \eta_{i,0}}{\partial t} + \nabla \left(\int_{\eta_{i,0}}^{\eta_{i,1}} \varepsilon dz \nabla \phi_i \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \phi_i)^2 + g \eta_{i,j} + (p_{i-j} + P_i) / \rho_i = 0 \quad (2)$$

ここで、 $(\nabla \phi_i)^2 \equiv |\nabla \phi_i|^2$ ($\phi_i = \phi_i(x, t)$) とする。 g は、重力加速度であり、 $P_i = \sum_{k=1}^{i-1} (\rho_i - \rho_k) g h_k$ は、各層毎に定まる定数である。また、 $\varepsilon^{\eta_{i,j}} = \varepsilon|_{z=\eta_{i,j}}$ とする。

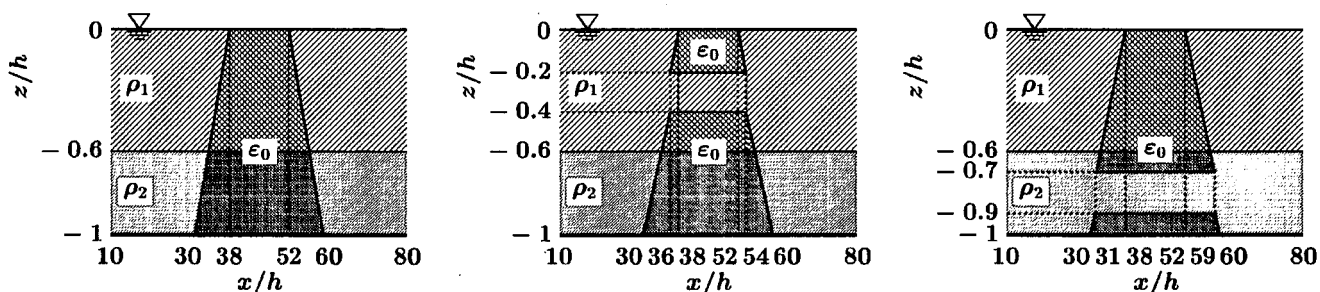
ここでは、砕波を考慮しない。また、多孔水平板の多孔部でのエネルギー消失が消波効果に有効であるとの報告があるが¹⁵⁾、こうした形状による効果や、空隙内の流体に対する抵抗力及びエネルギー減衰を考えない。

構造物の表面付近に、空隙率が滑らかに急激に変化する遷移領域を設ける。例えば、図-4(a)の Structure C-1 の場合、鉛直断面 ($x-z$ 平面) 内の直線 $x/h = 45$ 上では、 ε を図-5のように次式で定義する。



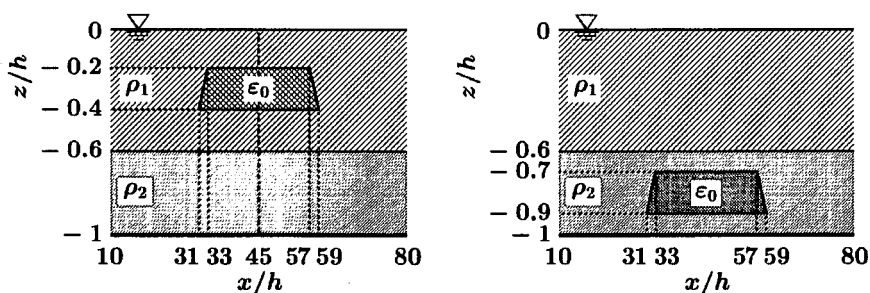
(a) A-0: 天端が静水海面位にある。 (b) A-1: 天端が上層内にある。 (c) A-2: 天端が下層内にある。

図-2 透水性潜堤 (Structure A)



(a) B-0: 通水路がない。 (b) B-1: 通水路が上層内にある。 (c) B-2: 通水路が下層内にある。

図-3 通水路を有する透過性防波堤 (Structure B)



(a) C-1: 没水平板が上層内にある。 (b) C-2: 没水平板が下層内にある。

図-4 没水平板 (Structure C)

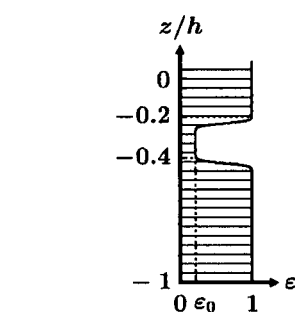


図-5 Structure C-1 に対する空隙率の鉛直分布 ($x/h = 45$)

$$\varepsilon(z) = \left\{ \frac{1 + \varepsilon_0}{2} - \frac{1 - \varepsilon_0}{2} \tanh \left(c + \frac{2cz + 0.4}{d} \frac{1}{h} \right) \right\} + \left\{ \frac{1 - \varepsilon_0}{2} + \frac{1 - \varepsilon_0}{2} \tanh \left(c + \frac{2cz + 0.2}{d} \frac{1}{h} \right) \right\} \quad (3)$$

ここで、 c 及び d は、ともに正の定数である。今回の計算では、 $c = 4.0$ 、 $d = 0.1$ とする。なお、不透水性構造物に対しては、空隙率を $\varepsilon_0 \ll 1$ と設定するが、その場合、構造物の表面付近における計算格子 1 mesh 当たりの物理量の変化量を抑えて計算を安定にする必要がある。空隙率の分布形や遷移領域の幅に応じて、数値計算に用いる mesh 間隔を十分に狭くすることになる。

3. 種々の形式の透過性構造物周辺における表面波・内部波・流れ共存場の数値計算

(1) 表面波の伝播

鉛直断面において表面が大気と接する 2 層問題を対象とし、表面、内部界面の位置をそれぞれ $z = \zeta$ 、 $z = \eta$ とする。数値計算では、柿沼・渡辺¹⁶⁾と同様の差分法を用いて式 (1)、(2) を解く。流体の密度比を $\rho_2/\rho_1 = 1.025$ とし、 $h_1/h_2 = 1.5$ とする。構造物の空隙率は、 $\varepsilon_0 = 0.2$ とする。計算領域は、両側方端を滑らかに接続する。

初期状態において、流速を至る所で 0 とする。表面、または、critical level より下に位置する内部界面に、上

に凸の孤立波型の初期波形を与え、これが分離して生成する表面波や内部波が伝播する際の、各種構造物周辺及び内部における波・流れ場の解析を行なう。

まず、表面に初期波形 $\zeta(x, 0) = 0.1h/(10^s + 10^{-s})$, $s = 0.1x/h$ を与え、内部界面を $\eta(x, 0) = -h_1$ として、表面波の伝播について調べる。計算結果を図-6に示す。図-6 (a) では、波速が3ケースで異なる。このうち、A-0 が最も波速を減少させ、波高の減少率も大きい。図-6 (b) では、B-1 と B-2 にほとんど違いが見られず、B-0 ほど波速を減少させない。図-6 (c) では、C-1 と C-2 が同様に波速を減少させる。

(2) 内部波の伝播

次に、内部界面に初期波形 $\eta(x, 0) = 0.1h/(10^s + 10^{-s}) - h_1$, $s = 0.1x/h$ を与え、表面を $\zeta(x, 0) = 0$ として、内部波の伝播について調べる。図-7 (a) によると、A-0 と A-1 が同様の影響を内部波に及ぼす。これに対して A-2 を設置した場合、反射がほとんど生じず、内部波高の減少率が低くなる。図-7 (b) では、B-1 と B-2 にも波速の違いが見られる。図-7 (c) においても、C-1 と C-2 に波速の差異が見られるが、構造物がない場合との違いは、表面波ほど大きく現れていない。このように、内部波の伝播特性に対する構造物の影響には、表面波との相違が見られる。

(3) 水粒子の軌跡

港内の海水が、潮汐や短周期の波動等の働きによって港口の構造物を通過して港外に排出される場合、港内での長時間の滞留による水質の悪化が抑制される。また、港外から比較的きれいな海水が港内に流入すれば、港内の水質が改善される。こうした、港口や湾口部に位置する構造物前後の海水交換の詳細については、濃度や温度とともに海水の移動量を評価する必要があるが、本研究では、領域内に配したマーカ粒子の運動を追跡する。マーカ粒子の湾内における残留率も海水交換量の指標となるが¹⁷⁾、ここでは、非線形波の伝播に伴う時々刻々の粒子運動にも着目し、各層内の実流速による水粒子の軌跡を調べる。図-7 の場合と同一の条件のもとで水粒子を追跡した結果を図-8 ~ 10 に示す。概ね、下層では、内部波の進行方向に水粒子が移動するが、上層では、逆方向に水粒子が進む。

水粒子の実流速 u の、計算対象時間 ($0 \leq t\sqrt{g^*/h} \leq 400$, $g/g^* = 9.8$) にわたる時間積分の絶対値を l とする。図-8 において、上層では、堤体内の l は、A-0 が最も大きく、A-1 と A-2 があまり変わらない。堤体外の l は、A-0, A-1 及び A-2 にあまり差異がない。このことは、A-0 では、堤体内の水粒子がより堤体前面に近づくように運ばれたが、上に凸の内部波が継続して進行して来ない限り、粒子が前面付近に留まることを意味する。海水交換には、堤体内外の流況が関係す

る。一方、下層では、A-0 と A-1 の流跡が類似しており、堤体内で、逆流によって水粒子が戻されて粒子の移動振幅が大きくなる。これに対して A-2 では、反射による逆流が見られず、堤体内と堤体背後で l が比較的大きい。従って、上に凸の内部波の進行に伴い、 x/h の大きな堤体背後に粒子が抜けやすい。図-9 において、上層では、B-0 と B-2 の流跡が類似しているが、下層では、B-0 と B-1 の流跡が類似しており、B-2 より堤体内の振幅が大きい。図-10 において、上層では、3 ケースの l があまり変わらない。下層では、構造物のない場合と比較して、C-1 の流跡は、あまり変わらないが、C-2 の l は、堤体内でのみ大きくくなっている。

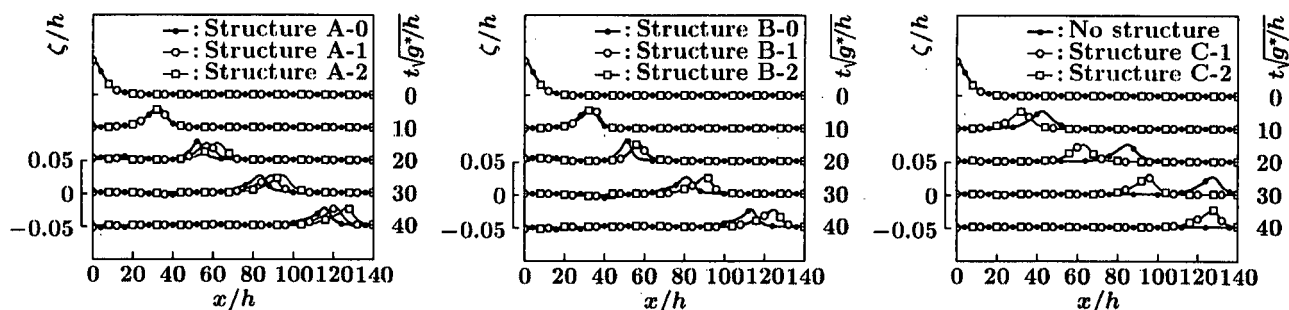
4. 結 論

成層化した水域に設置された各種構造物周辺及び内部における波・流れ場の非線形数値計算を行なった。透過潜堤は、波の進行や海水交換を許すために比較的複雑な形をなすが、本モデルでは、連続に分布する空隙率を用いて、任意形状の構造物を表現できる。鉛直断面内の2層問題に対して、次のような結論を得た。

- ・潜堤の堤体高は、表面波の波高及び波速に影響する。また、天端の位置（上・下層のどちらにあるか）によって内部波の伝播や下層の水粒子の運動が異なる。
- ・防波堤の通水路の位置は、表面波に対するよりも、内部波及び上・下層の粒子運動に大きく影響する。
- ・没水平板の設置位置が上層内か下層内かによって、表面長波及び上層の粒子運動に違いがあまり生じないが、内部長波の波速と下層の粒子運動が変化する。

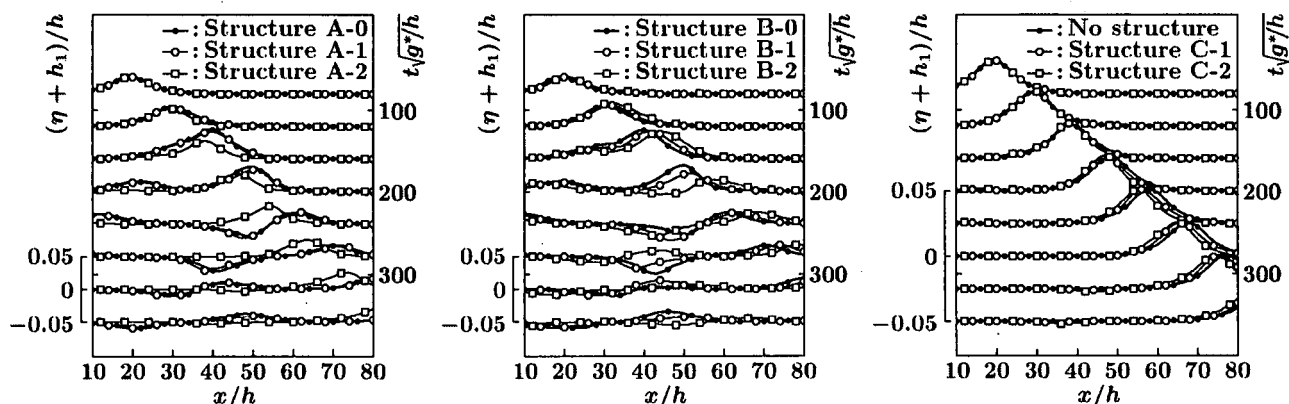
今回の数値計算は、基礎研究として、長波近似のもとに行なわれた。そのため、通水路や没水平板は、主として、その地点における水平方向の流水の断面積を変える働きを持つ。従って、通水路がその流入・流出口付近の流速に比較的急激な空間分布を与えたり、また、没水平板が鉛直方向流速を遮って層内の運動をある距離にわたって上・下に分割するといった効果を十分に再現していない。今後、鉛直分布関数を多数項用いて、水平方向流速の鉛直分布や鉛直方向流速、そして、各方向の加速度の効果をより厳密に考慮した計算を行ない、ここで得られた結果と比較する必要がある。

本研究では、2層密度流モデルを適用して上・下層で異なる流況を再現したが、こうした運動は、単層モデルで得ることのできないものである。また、本数値モデルは、平面方向に広がりのある領域に拡張可能である。港湾の内・外を連結した領域において、表面波や内部波の進行に伴う物質の3次元的な運動を追跡し、魚礁や汽水域の生態系に影響を及ぼす内部波の伝播特性や、水質保全に関わる海水交換機構を考慮した波・流れ場の制御について、透過性潜堤の機能を検討したい。



(a) 表面波の伝播 (Structure A) (b) 表面波の伝播 (Structure B) (c) 表面波の伝播 (Structure C)

図-6 表面波の伝播 ($\rho_2/\rho_1 = 1.025$, $h_1/h = 0.6$, $\varepsilon_0 = 0.2$)



(a) 内部波の伝播 (Structure A) (b) 内部波の伝播 (Structure B) (c) 内部波の伝播 (Structure C)

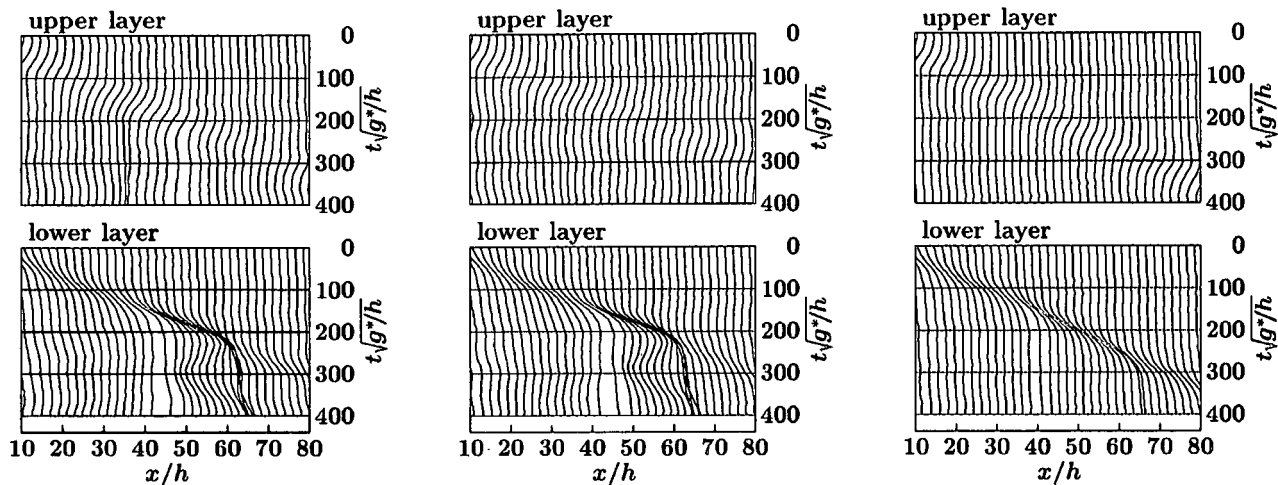
図-7 内部波の伝播 ($\rho_2/\rho_1 = 1.025$, $h_1/h = 0.6$, $\varepsilon_0 = 0.2$)

謝辞：本研究を遂行するにあたり貴重な御助言を頂いた東京大学大学院工学系研究科渡辺 晃教授に謝意を表します。また、水粒子の軌跡の解析では、環境問題に対しても定量的な評価が必要であるという査読時の御示唆が参考となりました。

参考文献

- 1) 塩崎禎郎・磯崎総一郎・中村 滋・堀内 博: 海水交換機能を有する透過型スリットケーソンの水理特性, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1226-1230, 1996.
- 2) 佐藤秀輝・笹島 博・辻 安治・永末英之: 多翼式透過性防波堤の水理特性に関する実験, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 641-644, 1993.
- 3) 滝川 清・山田彦彦・松本健作: 潜堤上砕波変形の内部特性とその数値解析, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp.66-70, 1995.
- 4) 川崎浩司・岩田好一朗: 潜堤による平面 2 次元波の砕波変形の数値解析, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 81-85, 1997.
- 5) 織田幸伸・岩田好一朗・金 度参: 潜水構造物による砕波の数値解析, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 601-605, 1993.
- 6) Gao, X., K. Inouchi and T. Kakinuma: Wave reflection, transmission and harmonics due to different submerged structures, Acta Oceanologica Sinica, Vol. 19, No. 2, pp. 111-125, 2000.
- 7) 榊山 勉・阿部宣行・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.

- 8) 松見吉晴・石田英雄・木村 晃: 幅広潜堤内に発生する流体圧力の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 781-785, 1993.
- 9) 水谷法美・前田健一郎・A. M. Mostafa・W. G. McDougal: 透水性構造物の抵抗係数の評価と波・潜水透水性構造物の非線形相互作用の数値解析, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 131-135, 1996.
- 10) 劉 曉東・堺 茂樹: 大型弾性浮体下での孤立波の分裂に関する数値解析, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 31-35, 2000.
- 11) 柿沼太郎: 海面や海中で振動する大規模薄板構造物と相互干渉する表面波及び内部波の非線形数値計算, 海洋開発論文集, 第 17 巻, pp. 181-186, 2001.
- 12) 柿沼太郎: 透水性海浜における内部波の挙動の数値計算, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 146-150, 2001.
- 13) 森田修二・出口一郎: スロープ水路を有する透過性防波堤に関する研究, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 1101-1105, 1999.
- 14) 村上仁士・伊藤禎彦・細井由彦・澤村賀行: 波動場における傾斜没水平板周辺の流れ特性, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp.671-675, 1993.
- 15) 服部昌太郎: 水平板式透過性防波堤の波高伝達, 海岸工学講演会論文集, 第 22 巻, pp.513-517, 1975.
- 16) 柿沼太郎・渡辺 晃: 海面や海底の動揺が生成する内部波の数値計算, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, II, pp. 4-5, 2000.
- 17) 武内智行: 内部潮汐を考慮した湾の流況予測シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1141-1145, 1996.

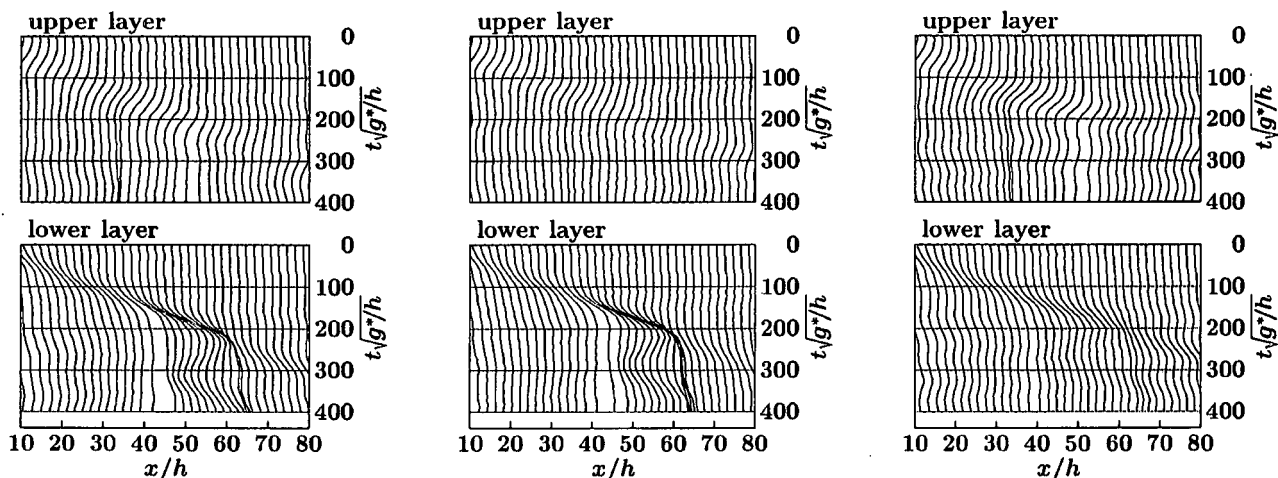


(a) Structure A-0

(b) Structure A-1

(c) Structure A-2

図-8 Structure A の周辺及び内部における流跡線 ($\rho_2/\rho_1 = 1.025$, $h_1/h = 0.6$, $\varepsilon_0 = 0.2$)

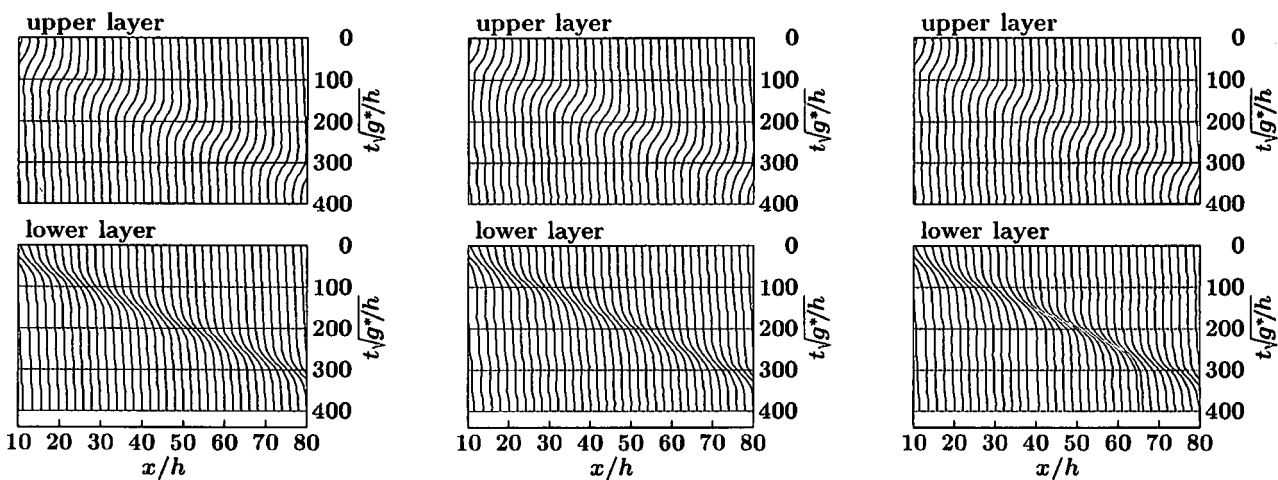


(a) Structure B-0

(b) Structure B-1

(c) Structure B-2

図-9 Structure B の周辺及び内部における流跡線 ($\rho_2/\rho_1 = 1.025$, $h_1/h = 0.6$, $\varepsilon_0 = 0.2$)



(a) No structure

(b) Structure C-1

(c) Structure C-2

図-10 Structure C の周辺及び内部における流跡線 ($\rho_2/\rho_1 = 1.025$, $h_1/h = 0.6$, $\varepsilon_0 = 0.2$)