

海水交換機能を有する直立消波ケーソンの開発

Development of Wave Dissipating Caisson with the Function of Water Exchange

塩崎 禎郎* 磯崎 総一郎* 中村 滋** 堀内 博**

Yoshio Shiozaki, Soichiro Isozaki, Shigeru Nakamura, Hiroshi Horiuchi

A new concept of caisson having the function of water exchange and wave dissipation is proposed in this paper. This caisson is a kind of a permeable slit caisson with a submerged vertical plate in a water chamber. By carrying out the experiment, the following results were obtained;

- 1) The caisson is able to generate one-way flow from outer sea into harbor. Consequently, water exchange is enhanced effectively.
- 2) The caisson has a good wave dissipating performance comparing ordinary caissons. In this paper, the design method of the caisson is also presented.

Keywords; (Water exchange, Wave dissipation, Slit caisson)

1. はじめに

防波堤はこれまで港湾内の静穏性確保に重点を置いて整備されてきた。そのため、防波堤によって囲まれた水域は閉鎖性が強く、港湾内の水質悪化が問題となることがある。近年の環境に対する関心の高まりを背景として、港内の静穏性を確保する一方で、海水交換を促進して水質保全を図るという技術的には二律背反ともいえる課題に多くの機関が取り組んできた。さて、海水交換を促進する方法は大きく「潮汐・潮流の利用」、「波浪の利用」に分類される。「潮汐・潮流の利用」は潮汐・潮流による流れのエネルギーを利用するもので、透過型構造が適用されている。また、「波浪の利用」は波のエネルギーを利用し、港内側への流れを発生させるもので、潜堤付き孔あき防波堤¹⁾、消波ブロック被覆型有孔堤²⁾などが開発され、実際に建設されている。特に、志賀島漁港に設置された潜堤付き孔あき防波堤は水質環境改善効果が現地調査によって報告されており注目される³⁾。このような背景をふまえて、筆者らは、ハイブリッドケーソン（鋼-コンクリート合成版を構造部材に用いたケーソン）においても「波浪の利用」による海水交換が行える新構造の開発に取り組んだ。開発の着眼点は以下の2点である。1) 比較的水深の深い場所においても、より簡易な構造で効率的かつ確実な海水交換が可能なること。2) 移流による海水交換（一方向の流れにより、港内水を外海水と置き換える）が行えること。その結果、図-1に示すような透過型ケーソンの遊水室内部に鉛直版を設けた新構造を見出した。ここでは、新構造ケーソンの水理特性を把握するために行った2次元水槽実験の結果と、新構造ケーソンをモデル港湾に設置した場合の海水交換の有効性を確認するために行った数値シミュレーションの結果について報告する。

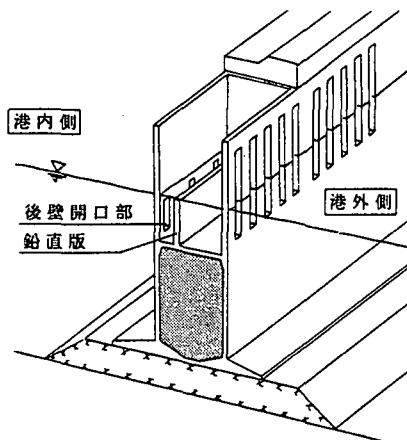


図-1 新構造ケーソン

2. 実験

2.1 実験概要

実験は、2次元造波水路（高さ0.8m×幅0.9m×長さ13.5m、吸収式造波装置付き）にアクリル製の模型をセットし表-1に示す条件にしたがって行った（想定縮尺率1/30）。模型は底面を5mmかさ上げして模型背後への流入水を還流させた。計測項目と計測方法は以下のとおりである（図-2参照）。

- (1) 後壁開口部での流速：Model-1～3bは計測点 $V_{m1} \sim V_{m5}$ の5点で計測し、造波開始後、波が定常状態になった後の5波の平均流速を算出（不規則波実験では100波） Model-4a～5bは $V_{11} \sim V_{13}$ を計測し、事前に求めておいた $V_{m1} \sim V_{m5}$ との関係から換算して平均流速を算出（流速は港内方向を正とした）
 - (2) 遊水室内水位：計測点 H_3 で容量式波高計により計測
 - (3) 波高伝達率：計測点 S_1 でサーボ式波高計により計測
 - (4) 反射率：計測点 H_1 、 H_2 で容量式波高計により計測し、合田による入・反射波分離法⁴⁾により算出
- 流速、波高データはサンプリング周波数を40Hzとして、AD変換後パソコンのHDに記録し、解析を行った。

* 正会員 NKK基盤技術研究所都市工学研究部 (〒210 川崎市川崎区南渡田町1-1)

** 正会員 NKK橋梁建設部土木・港湾計画室

表 - 1 実験条件

h cm	57.4		
H cm	2.5~6.7		
T sec	0.73~1.46		
Model	d/h_1	l_1/l	ϵ_2
Model-1	—	—	0.030
Model-2	1.00	0.23	0.030
Model-3a	0.78	0.23	0.030
Model-3b	0.62	0.23	0.030
Model-4a	1.00	0.13	0.030
Model-4b	1.00	0.35	0.030
Model-4c	1.00	0.46	0.030
Model-5a	1.00	0.23	0.045
Model-5c	1.00	0.23	0.060

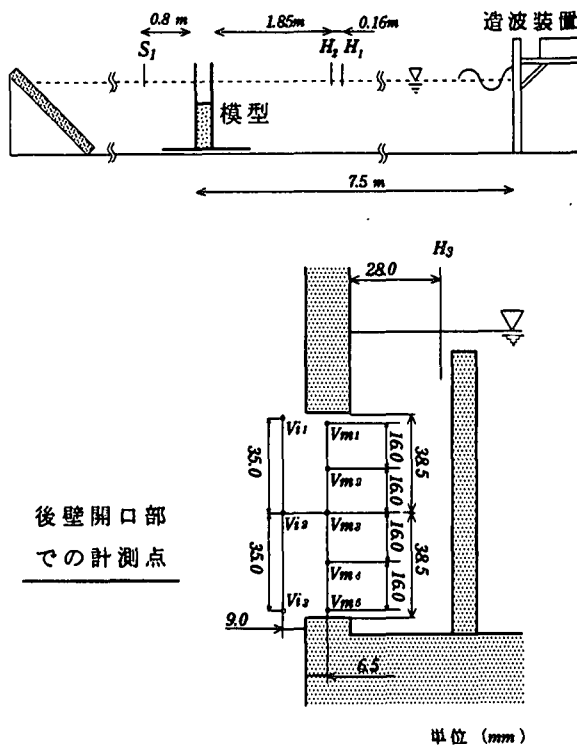
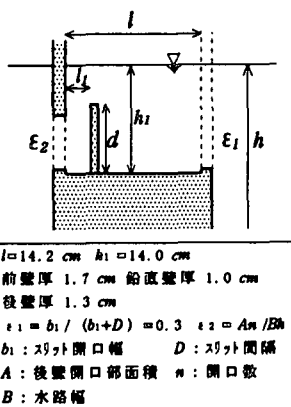


図 - 2 実験水槽と計測点

2.2 実験結果

2.2.1 導水特性

(1) 透過型ケーソンと新構造ケーソンの比較

透過型ケーソン (Model-1) と新構造ケーソン (Model-2) の後壁開口部中央 (計測点 V_{m3}) での流速波形を図-3に示す。両ケーソンともに、押し波時には遊水室内の水位上昇による港内との水位差により、港内側への流れが生じている。一方、引き波時には透過型ケーソンでは遊水室内の水位低下により、港外側への流れが生じているのに対し、新構造ケーソンでは、鉛直版によって後壁側の水位低下が押さえられるため、ほとんど港外側への流れは生じていない。したがって、流速波形はどちらも往復流となっているが、透過型ケーソンでは、ネットの流量がほぼ0となるのに対して、新構造ケーソンでは、ネットの流量が港内側へ確保されていることがわかる。図-4に鉛直版背後 (計測点 H_3) の平均水位上昇量 η と、後壁開口部の平均流速との関係を示す。港内側への導水は、後壁内外での水位差によって生じており、平均水位上昇量が大きいほど、港内側への平均流速が大きく、導水量が多くなることがわかる。

(2) 新構造ケーソンの波浪条件影響

後壁開口部の平均流速と入射波周期の関係を図-5に、入射波波高との関係を図-6に示す。平均流速は、周期、波高の両方に依存しており、周期が長いほど、波高が高いほど大きな値となっている。単位時間単位幅当たりの導水量 q ($q = A n \bar{u} / B$, A : 後壁開口部面積 n : 開口数 $\bar{u}$: 平均流速 B : 水路幅) を越波の指標として用いられる $\sqrt{2gH^3}$ (g : 重力加速度 H : 入射波波高) で無次元化し、波形勾配 H/L (L : 入射波波長) との関係を図-7に示す。無次元導水量 $q / \sqrt{2gH^3}$ は H/L に依存していることがわかる。

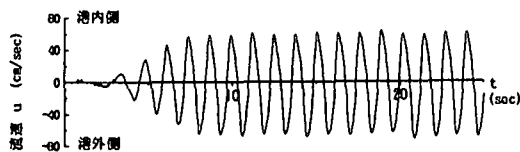
(3) 新構造ケーソンの構造諸元パラメーター影響

新構造ケーソンの構造諸元を変化させて導水量に及ぼす影響を調べた。無次元導水量と構造諸元パラメーターの関係を図-8~10に示す。なお、ここでは入射波が微小振幅波領域のデータのみ表示している。

(a) 鉛直版高さ

Model-2, 3a, 3b を用いて検討した結果を図-8に示す。図より鉛直版天端が水面と一致したときに最も導水量が多くな

透過型ケーソン (Model-1)



新構造ケーソン (Model-2)

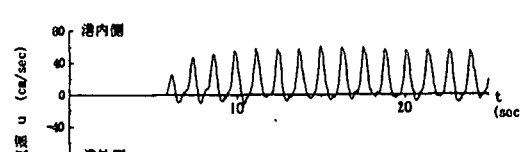


図 - 3 流速波形 ($T=1.28$ sec $H=3.3$ cm)

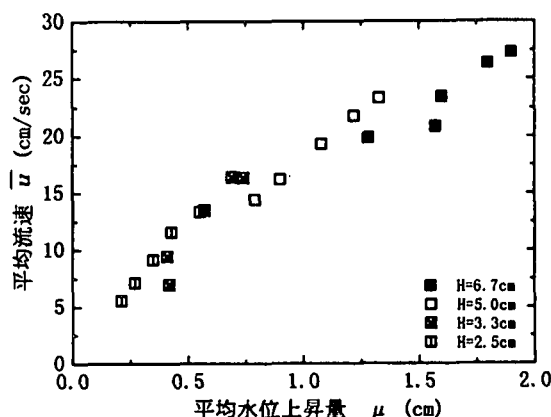


図 - 4 平均水位上昇量と平均流速の関係

ることがわかる。逆に d/h_1 が 0.6 程度では、導水量はほとんど 0 で鉛直版のない透過型ケーソンと変わらない。これは、引き波時に鉛直版天端が水面上となると、初めて戻り流れを抑制し、港内側への流れを卓越させることになるからである。鉛直版天端が水面と一致したときに最も導水の効率が良いことは文献 1)、5) の実験結果と一致する。

(b) 鉛直版位置

Model-2、4a、4b、4c を用いて検討した結果を図-9 に示す。図より、 $l_1/l=0.23$ のとき導水量がピークを示す分布となる。この理由として次の 2 点が考えられる。すなわち、1) 鉛直版の設置位置が港外側になるにつれて、打ち上げ高さが低下し、鉛直版を越波する水量が減少する、2) $l_1/l=0.13$ のときには後壁と鉛直版が近すぎて、越波した水量を十分に貯水できず、港外側への戻り流れが生じる。

(c) 後壁開口率

Model-2、5a、5b を用いて検討した結果を図-10 に示す。図より、 $\varepsilon_2=0.03$ に比べ $\varepsilon_2=0.045$ 、 0.06 の方が導水量が多くなることがわかる。但し、 $\varepsilon_2=0.045$ 、 0.06 の差はほとんどない。これは、 $\varepsilon_2=0.03$ のときには、鉛直版を越波した水量が全て後壁開口部から港内側へ流れるのではなく、一部が鉛直版から港外側への戻り流れとなるのに対し、 $\varepsilon_2=0.045$ 、 0.06 では越波水量のほとんどが港内側へ流れるためである。

(4) 不規則波の影響

これまで、海水交換型防波堤の実験は規則波で基本性能を把握した後、不規則波を用いた検証実験が行われてきた。そこで 1 例ではあるが、不規則波を用いた検証実験を行ったので結果を示す。不規則波は Bretschneider-光易型スペクトルを用い、 $H_{1/3}=3.7\text{cm}$ 、 $T_{1/3}=1.13\text{sec}$ ($\bar{H}=2.4\text{cm}$ 、 $\bar{T}=1.00\text{sec}$) とした。不規則波による後壁での平均流速は 7.31cm/sec に対し、規則波 ($H=2.4\text{cm}$ 、 $T=1.00\text{sec}$) では 8.23cm/sec となった。不規則波の流速が規則波と比べ 9割程度の値となっているが、これは、文献 1)、6) で報告されている実験結果と同様な傾向を示している。

2.2.2 消波特性 (波高伝達率)

図-11 に透過型ケーソンと、新構造ケーソンの鉛直版高さを変化させた場合の波高伝達率 KT を示す。横軸は L/l で波の周期で決まる量であり、 KT の周期依存性は小さいことがわかる。透過型ケーソンと、鉛直版が没水しているときの KT は 0.2 前後の値を示すのに対して、鉛直版天端が水面と一致している場合は 0.1 程度となり港内側への波高伝達が押えられることがわかる。

2.2.3 消波特性 (反射率)

図-12 に透過型ケーソンと新構造ケーソンの反射率 KR を示す。短周期領域の一部を除いて、新構造ケーソンの KR が高くなっている。これは、消波性能に影響を及ぼす遊水室幅が、鉛直版によって実質狭くなっているためである。実線は前壁から鉛直版までを遊水室幅として計算した理論値である。実験値が計算値より小さな値を示すのは、鉛直版を越波することによるエネルギー損失や、後壁からの反射波との位相干渉による影響などが考えられる。

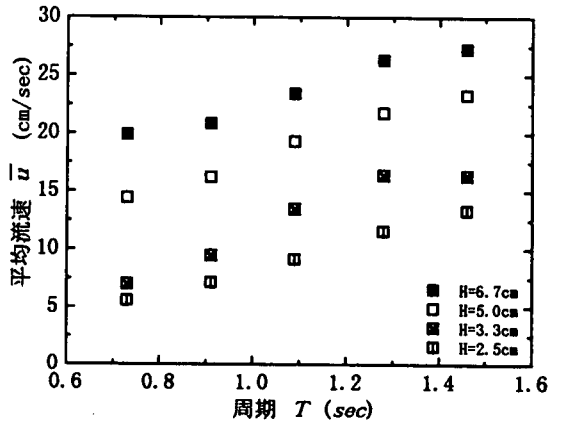


図-5 入射波周期と平均流速の関係

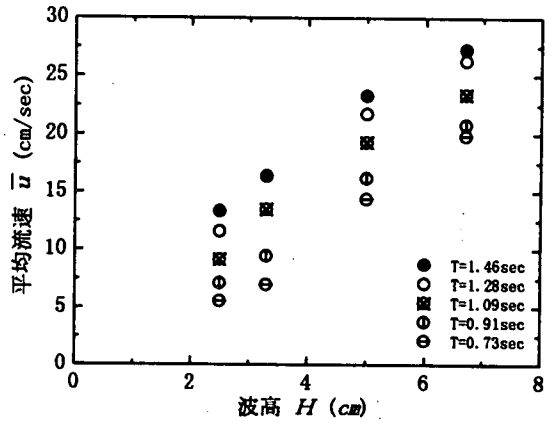


図-6 入射波波高と平均流速の関係

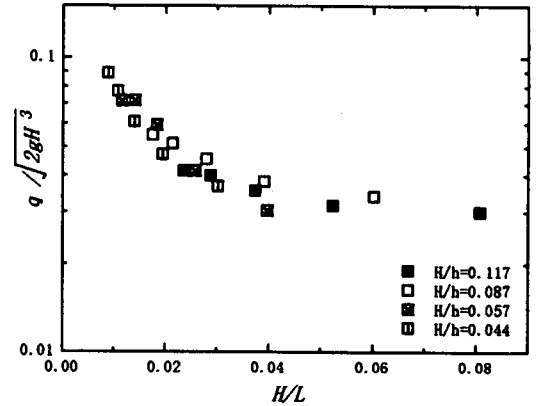


図-7 波形勾配と無次元導水量の関係

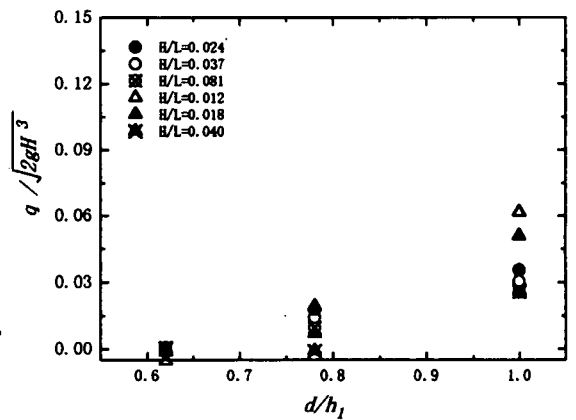


図-8 鉛直版高さとの無次元導水量の関係

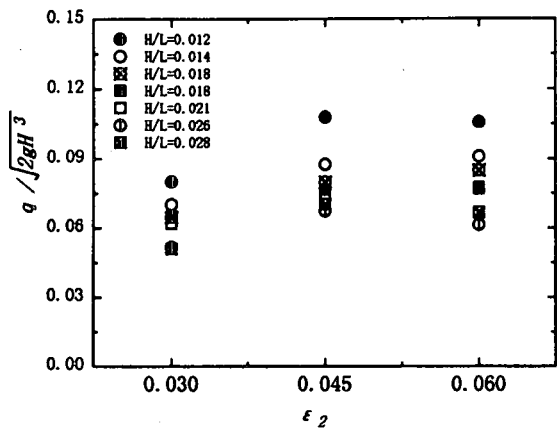


図-9 鉛直版設置位置と無次元導水量の関係

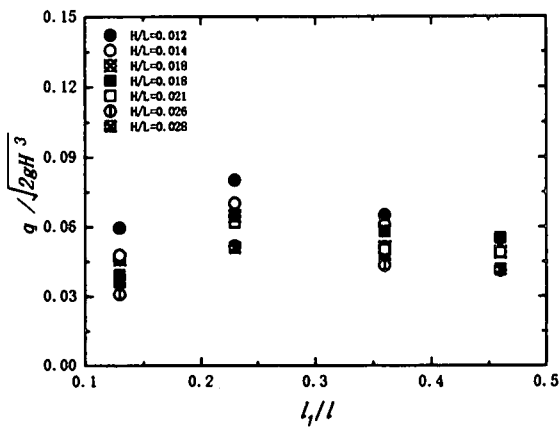


図-10 後壁開口率と無次元導水量の関係

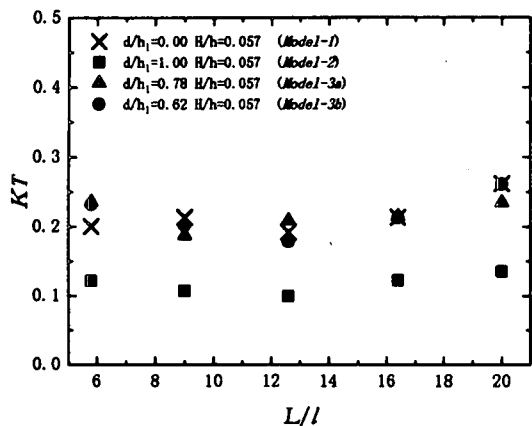


図-11 波高伝達率

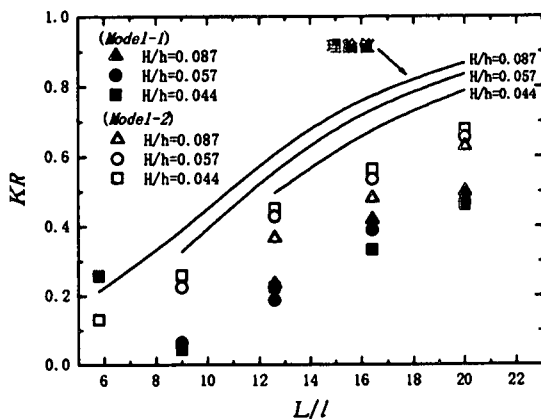


図-12 反射率

3 実機への適用検討

3.1 構造断面決定にあたっての留意点

海水交換型防波堤を計画する場合、まず水質環境の事前調査結果と、港内で維持すべき水質条件から、必要な導水量を求める。次に、構造諸元の導水性能に与える影響と海水交換型防波堤の設置延長を考慮して、導水量を満足する断面を決定する。今回の実験データから得られた構造断面を決定する際の留意点を述べる。

- (1) 鉛直版設置位置：実験結果より $l_1/l=0.2$ 程度の位置が最も導水効率が良いが、後壁と鉛直版の間隔は施工上問題とならない最小幅とするのが現実的である。
- (2) 鉛直版高さ：鉛直版天端が水面上となると導水量が急激に減少するため、干潮時水位に合わせる。ただし、潮位差が大きな場合、隔壁で隔てられた遊水室ごとに鉛直版高さを調整して対応することが考えられる。
- (3) 消波性能（反射率）：遊水室幅は前壁から鉛直版までとして消波性能を評価すると安全側となる。

3.2 海水交換性能の検討

図-13に示すモデル港湾を想定して、以下の条件における海水交換の検討を行った。

Case-A：海水交換堤の設置無し

Case-B：海水交換堤（新構造ケーソン）を港奥部に50mの長さになわって設置

3.2.1 海水交換回数

海水交換回数 α は「港内水の入れ替わりかかる時間」として

(1) 式で定義される⁷⁾。

$$\alpha = Q/V \quad \dots\dots (1)$$

(Q ：単位時間当たりの海水流入量 V ：港内水量)

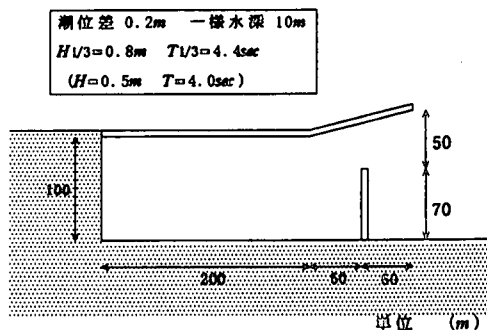


図-13 モデル港湾

Case-Bの新構造ケーソンによる導水量は、図-13の波条件と図-7の無次元導水量から q を求め、潮位変動による導水量の低下を3割と仮定して、 $Q=2.2m^3/sec$ と見積もった。Case-A、Case-Bの海水交換回数を表-2に示す。Case-Aの導水量は潮汐による導水のみで α は0.04回/dayと小さな値となる。また、潮汐に起因する海水流動による実質の海水交換量は、最大で3割程度と指摘されており⁸⁾、実質の α は上記の値よりさらに小さくなる。Case-Bでは、潮汐に加えて、新構造ケーソンからの導水が行われるため α は0.79回/dayとなる。このように、新構造ケーソンを設置することにより、海水交換回数 α が飛躍的に向上することがわかる。

表-2 海水交換回数

	Case-A	Case-B
Q (潮汐による導水) m^3/day	10,100	10,100
Q (海水交換場による導水) m^3/day	—	189,300
V (港内水量) m^3	252,500	252,500
α (海水交換回数) 回/day	0.04	0.79

3.2.2数値シミュレーション

Case-A、Case-Bに対する実際の流況把握のため数値シミュレーションを行った。シミュレーションモデルは、流れと拡散現象を海底から海面までを平均して表現する2次元単層モデルを採用した。計算手法は、時間に関して leap-frog 法、空間に関しては中央差分を適用した。潮流の基礎方程式は(2)～(6)式に示す非線形浅海長波方程式を適用した。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) - fn + \frac{gn^2 M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^{3/2}} = 0 \quad \dots (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) + fm + \frac{gn^2 N \sqrt{M^2 + N^2}}{D^{3/2}} = 0 \quad \dots (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots (4)$$

$$M = Du \quad N = Dv \quad \dots (5) \quad (6)$$

ただし、

u : x 方向流速 v : y 方向流速 D : 全水深 ($=h+\eta$ h : 水深 η : 水位変動)
 n : マニングの粗度係数 A_h : 動粘性係数 f : コリオリの係数
計算条件を表-3に示す。なお潮汐流の外洋境界は(7)式より任意の時間の水位を設定し、位相差は岸平行方向に2.0度とした。

表-3 計算条件

格子間隔	m	10
計算領域	km	2.5 (岸方向) 1.0 (岸方向)
計算時間間隔	sec	0.4
動粘性係数 A_h	cm^2/sec	1.0×10^4
粗度係数 n		0.024
コリオリ力 f	rad/sec	無視

ただし、

η_i : 境界点の水位 A_i : 潮位振幅 ω : 潮位の角速度 t : 任意の時間
 L_i : 遅れ角

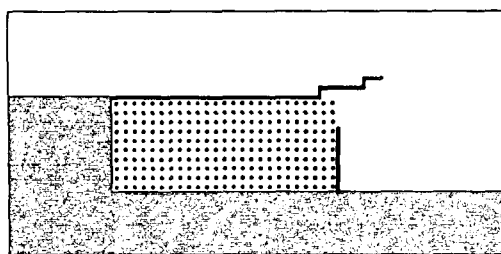
また、新構造ケーソンでの流れは、平均流量が3.2で定めた値として港内方向で変動する正弦波で与えた。流況は、港内に初期配置したマーカーの拡散から把握した。

図-14に Case-A、Case-B のマーカーの拡散の様子を示す。Case-A では、1 潮汐後にほとんど港内のマーカーが港内に残存しているのに対して、Case-B では新構造ケーソンから外海水が導水され、港奥から港口方向の流れが生じ、マーカーが港外へと流出していく様子がわかる。このように、新構造ケーソンの設置によって港内の海水交換が促進されることがわかる。

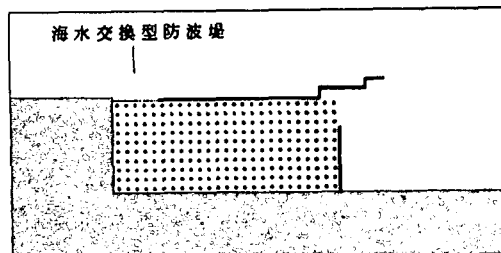
Case-A

Case-B

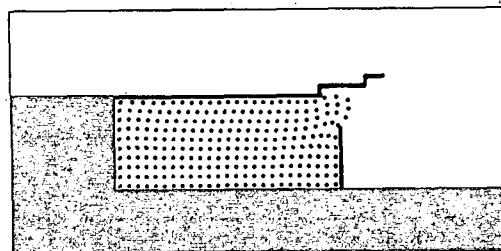
初期配置



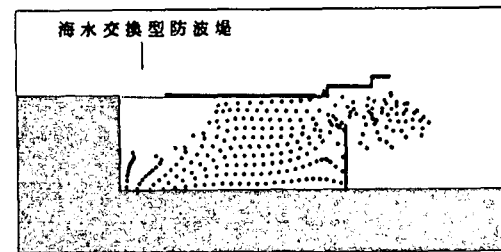
海水交換型防波堤



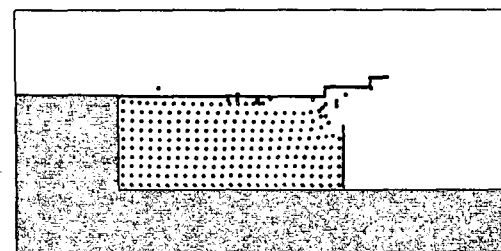
0.25潮汐後



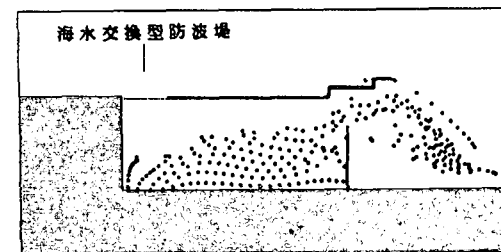
海水交換型防波堤



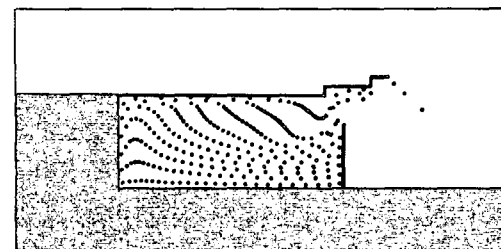
0.50潮汐後



海水交換型防波堤



1.00潮汐後



海水交換型防波堤

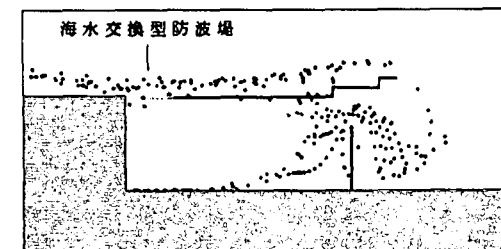


図-14 数値シミュレーション結果

4 まとめ

海水交換型防波堤のニーズに対応した新構造ケーソンを考案し、2次元水槽実験により水理特性を把握した。その結果、新構造ケーソンは以下の特長を有することがわかった。

- (1) 透過型ケーソンの遊水室に鉛直版を設置することにより、港内側への一方的な導水が行えるため、海水交換の効率が飛躍的に向上する。
- (2) 鉛直版により港内側への波高伝達が押さえられるため、港内の静穏性を確保できる。

さらに、実機への適用にあたって、構造断面決定上の留意点を述べ、新構造ケーソンを適用した場合の海水交換について、海水交換回数と数値シミュレーションにより、その有効性を示した。最後に、本研究を進めるにあたって、貴重なご助言を頂いた、水産省水産工学研究所漁港水理研究室 中山哲殿 室長、山本 潤 前技官、運輸省港湾技術研究所耐波研究室 高橋重雄 室長に深謝致します。

参考文献

- 1) 山本正昭ほか，“海水導入を目的とした潜堤付防波堤の開発（Ⅰ）” 水工研技報水産土木 Vol.10 pp.39-55 (1988)
- 2) 猿川 弦ほか，“消波ブロック被覆型有孔堤の海水交換特性に関する研究” 第40回海岸工学論文集 pp.971-975 (1993)
- 3) 山本 潤ほか，“志賀島漁港外港の導水工による環境改善効果に関する現地調査” 第41回海岸工学論文集 pp.1096-1100 (1994)
- 4) 合田良実ほか，“不規則波実験における入・反射波分離推定法” 港湾技研資料 No.248 pp.24 (1976)
- 5) 佐藤 仁ほか，“遊水部付き有孔堤の海水交換機能について” 海洋開発論文集 Vol.10 pp.103-106 (1994)
- 6) 道下 勲ほか，“鉛直管の水面固有振動を利用した海水交換防波堤の水理特性” 第35回海岸工学論文集 pp.577-581 (1988)
- 7) 開発土木研究所港湾研究室ほか，“海水交換防波堤の研究開発（Ⅲ）” 第36回北海道開発局技術研究発表会講演概要集（4） pp.163-172 (1993)
- 8) 山本正昭ほか，“浜田漁港内の海水流動について” 第28回海岸工学論文集 pp.466-470 (1981)