

# 海水交換型ハイブリッドケーソンの導水性能に関する現地計測

## Field Investigation on Water Inlet Ability of a Hybrid Caisson with a Function of Seawater Exchange

塩崎 禎郎 SHIOZAKI Yoshio JFE 技研 土木・建築研究部 主任研究員(副課長)  
本田 秀樹 HONDA Hideki JFE 技研 土木・建築研究部 主任研究員(係長)  
堀内 博 HORIUCHI Hiroshi JFE エンジニアリング 鋼構造事業部計画部 グループマネージャー(副部長)

### 要旨

JFE エンジニアリングは、港内の水質改善を目的として、海水交換機能を有するハイブリッドケーソン式防波堤を開発してきた。この特徴は、透過型スリットケーソンの遊水室内に、港内側への一方向流れをつくり出すための越波版を設けたことである。本構造が採用された三崎漁港において現地計測を行い、港内への一方向流れが生じていること、有義波高 0.25 m の条件で最大 0.2 m/s の導水流速であることを実証した。本稿では、現地での導水量計測結果、および、水理実験結果との比較について述べる。

### Abstract:

JFE Engineering has developed a hybrid caisson breakwater with a function of water exchange to improve the water quality in port and harbor. One of the characteristics of this caisson is having a permeable slit caisson with a submerged vertical plate in a water chamber to generate a one-way flow from offshore to harbor by this plate. Through the field investigation in Misaki Fishing Port, the authors proved that a one-way flow was generated from offshore to harbor, and maximum velocity 0.2 m/s was obtained under the condition of significant wave height 0.25 m. This paper describes the result of the field investigation and the comparison hydraulic model test with the field investigation.

## 1. はじめに

最近の港は、港内水域を船舶の係船や停泊以外に、魚の畜養や親水空間として利用される機会が増加している。ところが、港内水域の静穏度確保に重点を置いて防波堤整備を行った場合、港内水域は閉鎖性が強く、河川や水産加工施設などからの汚濁水の流入により、水質や底質の悪化が問題となることがある。この問題を解決するために、波浪や潮汐などの自然エネルギーを利用することで、港内外の海水交換(循環)を行うことのできるさまざまな構造形式の海水交換型防波堤が開発され、各地で建設されている<sup>1)</sup>。

JFE エンジニアリングでは、比較的水深の深い領域や軟弱地盤条件において経済的優位性を有するハイブリッドケーソン(鋼-コンクリート合成版式ケーソン)に海水交換機能を持たせた新しい構造を開発してきた。これまで、室内水理模型実験により、導水特性を明らかにしてきたが<sup>2,3)</sup>、このたび、本構造が実際に採用された神奈川県三崎漁港二町谷地区南防波堤において、導水特性を実証するための現地計測を行った<sup>4)</sup>。そこで、本稿では、現地での導水量計測結果と、水理実験結果との比較について概説する。

## 2. 海水交換型ハイブリッドケーソン

海水交換型防波堤は、利用するエネルギーとその原理で、以下に示す3つに分類することができる<sup>1)</sup>。

### (1) 潮汐、潮流のエネルギーの利用

防波堤に開口部を設けて、潮汐、潮流による流れの疎通によって、海水交換を行う。代表例としては、潮通し孔付き防波堤、透過型の直立消波防波堤、カーテン防波堤があげられる。

### (2) 波浪エネルギーの利用(混合拡散型)

常時の小さな波浪を利用して、防波堤開口部において内外の水位差によって生じる流れで防波堤内外の海水を希釈混合して、海水交換を行う方法である。構造は(1)と同じものとなるが、波による流れは往復流であるため、効果は防波堤近傍に限られるようである。

### (3) 波浪エネルギーの利用(越流型)

波のエネルギーを水位上昇に変換して、一方向の流れ(越流)を発生させる方法である。水産庁が開発された潜堤付き孔あき防波堤(Fig. 1)は、この方法で海水交換を行うものであり、すでに多くの実績を有してい

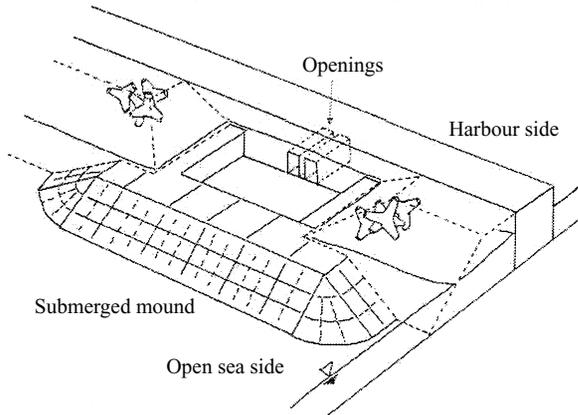


Fig. 1 Breakwater with submerged mound

る。

これらの中でも、(3)の越流型は、港内に常時一方向の流れを発生させるため、効率的な海水交換が期待できる。また、通水孔を水面下とすることで、港内静穏度の確保の面でも優位な構造である。このような海水交換機能と消波機能をケーソン単体に持たせた構造が、Fig. 2に示す「海水交換型ハイブリッドケーソン(消波機能付き)」である。

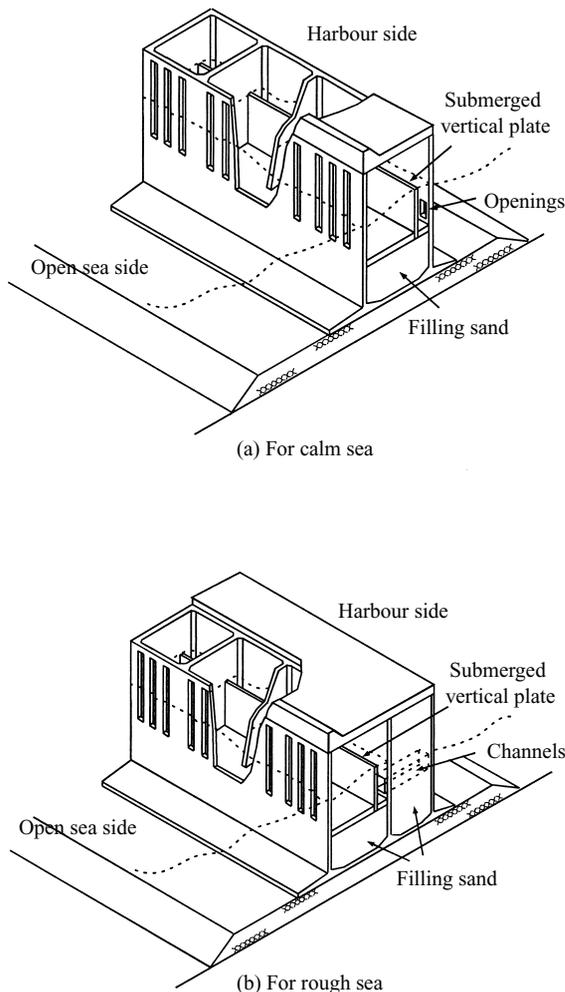


Fig. 2 Hybrid caisson with a function of seawater exchange

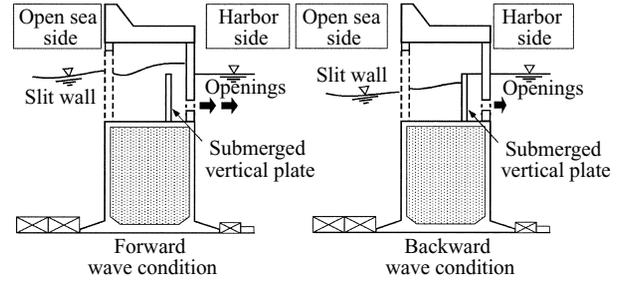


Fig. 3 Flow pattern of seawater exchange

(a)は、低波浪域を対象とした構造で、従来の透過型直立消波ケーソンの遊水室内に、越波版を設けたことを特徴としている。この越波版が、潜堤付き穴あき防波堤の潜堤の役割を果たしている。(b)は高波浪域を対象としているため、堤体幅を大きくする必要があり、(a)の開口部が導水管となった構造である。

本構造の海水交換のメカニズムをFig. 3に模式的に表す。押し波時には、スリット壁を透過してきた水塊が、越波版を乗り越え、水位上昇が生じ、開口部(導水管)から外海水が港内へ導水される。一方、引き波時には、後壁と越波版との間の水位低下が、越波版によって妨げられるため、戻り流れは生じない。したがって、常に一方向の流れを発生させることができる。

### 3. 三崎漁港における現地計測

#### 3.1 現地計測概要

三崎漁港は、神奈川県三浦半島の先端に位置する特定第三種漁港であり、船舶の大型化や畜養水域不足に対応するため、二町谷地区において漁港整備事業が進められている。主要外郭施設である南防波堤は、水深-10m~-20m、設計波高11.9mと非常に厳しい条件であるため、経済性、施工性から二重スリット付ハイブリッドケーソンが採用された。港外側を二重スリット構造とすることで、消波ブロック被覆堤と同等レベルの消波性能を確保している。また、港内水域は蓄養殖利用が計画されており、南防波堤に海水交換型ハイブリッドケーソンが設置されている。現地の平面図をFig. 4に示す。今回の現地計測は、陸側から約220m離れた14号函で行った。計測函断面をFig. 5に示す。本構造では、潮位変動による導水性能への影響を小さくするため、越波版の天端高さを2種類としている。また、直径1200mmの導水管が4.0m間隔で設置されている。ケーソンの完成状況をPhoto 1に、現地での越波版を波が越えていく様子をPhoto 2に示す。

現地計測は、2003年10月3日から11月27日までの2ヶ月間行い、波浪データと導水流速データ(越波版天端高+0.6m、+1.1mの2ヶ所)を計測した(以下、越波版天端高+0.6mをST-A、+1.1mをST-Bと表す)。導水流速データは、導水管の港内側開口部中央に電磁流速計を設置して、

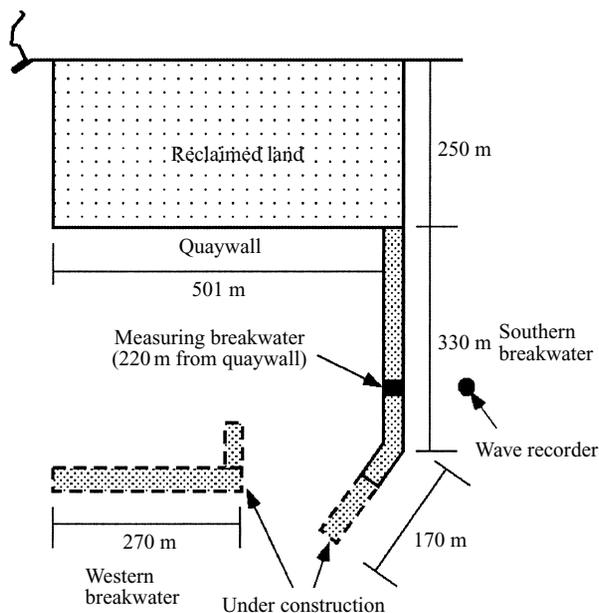


Fig. 4 Plan view of Misaki Fishing Port

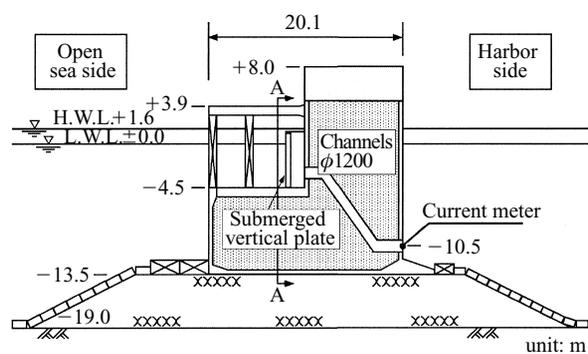
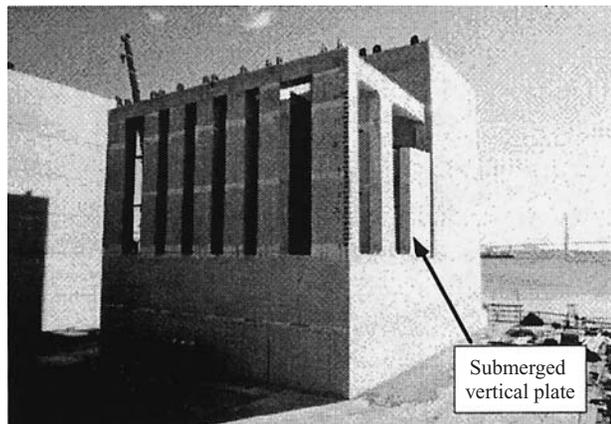
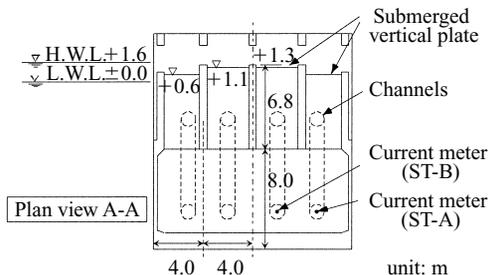
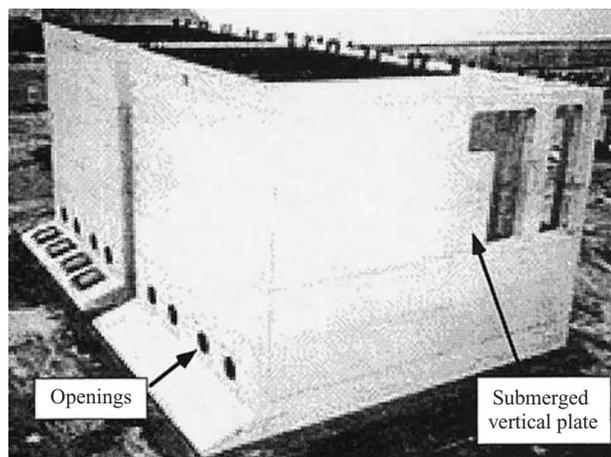


Fig. 5 Cross section of hybrid caisson with seawater exchange, Misaki Fishing Port



(1) Front view (CG modified)



(2) Rear view

Photo 1 Hybrid caisson, Misaki Fishing Port

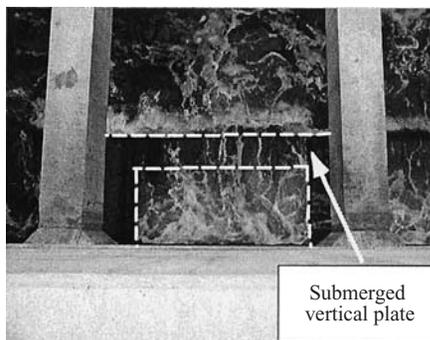


Photo 2 Overflow of the submerged vertical plate

流速(2方向, 北方分速, 東方分速), 方位, 水温を毎時4分間, サンプルング間隔1.0sで計測した。流速データの整理は, 計測した2方向成分から主流方向(導水管方向)を求め, 各流速ベクトルを主流方向に投影する補正を行った。また, 波浪データ(波高, 周期など)は, 計測箇所の港外側, 約80mの海底に超音波式波高計を設置し, 毎時20分間(毎正時±10分間), サンプルング間隔0.5sで計測した。今回の計測期間内では, 台風などの異常波浪はなかったため, 有義波高0.2m~1.5m, 周期(有義波周期)4.0~8.0s程度となっている。

### 3.2 現地計測結果

#### 3.2.1 有義波高と平均導水流速の関係

ST-Bにおける計測結果の一例として, 潮位と越波版高さが一致した10月15日12時~14時(潮位+1.11~1.21m, 有義波高0.51~0.57m, 周期6.9~7.5s)の導水流速時系列をFig. 6に示す。この波形から導水流速は, 波の作用によって変動するものの, 港内方向に卓越した一方向流れとなっていることが分かる。

ST-Bで計測した計測期間中の全データについて, 毎時4

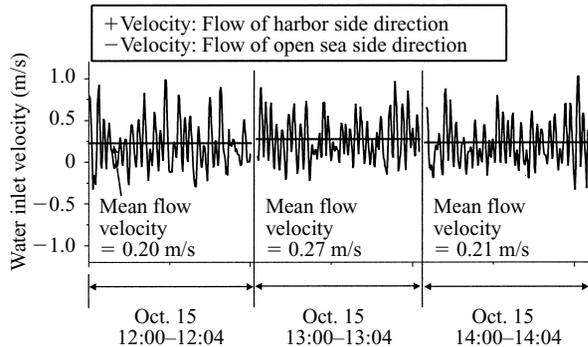


Fig. 6 Time series data of water inlet velocity (ST-B)

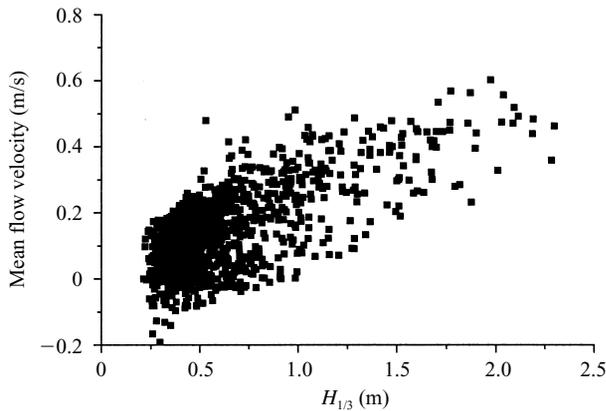
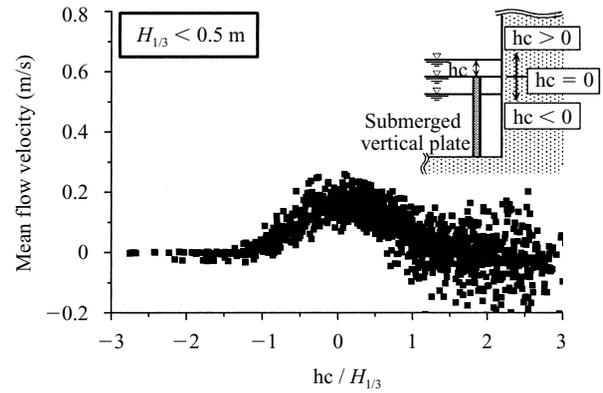


Fig. 7 Relation between mean flow velocity and significant wave height

Fig. 8 Relation between mean flow velocity and water surface elevation

分間計測した導水流速を平均値としてデータ処理し、有義波高との関係についてプロットした(Fig. 7)。図より、有義波高 0.25 m 程度のような低波浪の状態においても、最大で 0.2 m/s 程度の流速が生じており、確実に港内方向に導水されていることが分かる。導水流速は有義波高に比例して増加するが、ある波高に対する平均導水流速は、最大値と最小値で 0.3 ~ 0.4 m/s の幅をもっている。これは、潮位変動(潮位と越波版天端高の関係)の影響と、防波堤がすべて完成していないため、堤頭部から回折して進入してくる波によって港内側の水位変動が生じている影響と考えられる。

### 3.2.2 潮位変動が平均導水流速に与える影響

本構造は、越波版で一方向の流れを作り出すため、越波版と海水面(潮位)の関係によって導水性能が大きく変わってくる。そこで、越波版天端と海水面との距離  $hc$ (越波版が水没する状態をプラス、水面上に突出する状態をマイナス)を有義波高  $H_{1/3}$  で無次元化した  $hc/H_{1/3}$  を潮位変動の指標として、平均導水流速との関係を調べた。ST-A と ST-B の全計測データから有義波高 0.5 m 以下、0.5 m ~ 1.0 m の 2 つの階級に分けて抽出したデータを、 $hc/H_{1/3}$  と平均導水流速の関係についてプロットした(Fig. 8)。図より、平均導水流速は、水面位置と越波版天端が等しい条件 ( $hc/H_{1/3} = 0$ ) で最大となり、それ以外で減少するような凸型の分布を示している。水面位置が越波版天端よりも下側

( $hc/H_{1/3} < 0$ ) の場合、 $hc/H_{1/3} = -1.0$  程度で平均導水流速が 0 となる。これは、越波版が水面より有義波高の高さだけ突出すると、波が越波版を越えることができないためである。一方、水面位置が越波版天端よりも上側 ( $hc/H_{1/3} > 0$ ) の場合、 $hc/H_{1/3} = 1.5$  程度まで導水されている。 $hc/H_{1/3} = 1.5$  以上では、平均導水流速がマイナス値を示すことがあるが、波の谷作用時(引き波時)において遊水室内の水位が港内側よりも低下してしまうことや回折波による港内側の水位変動との位相差が影響しているものと考えられる。以上の結果から、本構造によって港内側一方に導水可能となる潮位の範囲は、水面位置が越波版天端高よりも有義波高程度下側から有義波高の 1.5 倍程度上側 ( $-1.0 < hc/H_{1/3} < 1.5$ ) までである。

### 3.3 室内水理模型実験結果との比較

この節では、これまでに実施した室内水理模型実験結果と現地計測結果の比較検討した結果を述べる。

#### 3.3.1 水理模型実験概要

水理模型実験は、吸収制御式の二次元造波水路を用いた規則波による実験である。実験条件を Table 1 に示す。縮尺率は、低波浪条件を再現するため、1/10 とした。そのため、防波堤断面の遊水室より上側部分だけモデル化した部分断面実験となっているが、低波浪条件であることから水粒子の運動は水面付近に限られるため、問題ないものと考

Table 1 Condition of experiment

Wave height, $H$ (m)	0.25, 0.5, 0.75, 1.0 (0.025, 0.05, 0.075, 0.1)
Wave period, $T$ (s)	4.0, 6.0 (1.26, 1.90)
$hc^*$ (m)	-0.4, 0, +0.4, +0.8 (-0.04, 0, +0.04, +0.08)
Size of channels** (m)	0.3, 0.5, 1.0, 1.5 (0.03, 0.05, 0.1, 0.15)

( ) : Experiment

\* Height between top of submerged vertical plate and water surface

\*\* Channels are rectangular.

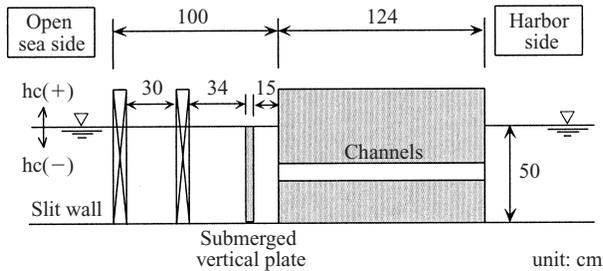


Fig. 9 Cross section of the models

えられる。実験断面を Fig. 9 に示す。なお、実験模型のスリット壁開口率、スリット壁設置間隔、越波版設置位置、導水管長さは、現地の計測函と同等である。

### 3.3.2 水理模型実験結果

現地での導水管断面積  $1.13 \text{ m}^2 (= \pi/4 \times 1.2^2 \text{ m}^2)$  に近い導水管サイズ  $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$  (矩形) の実験結果の一例として、周期  $6.0 \text{ s}$  での潮位変動と導水流速の関係を Fig. 10 に示す。導水流速は  $hc/H = 0$  で最大となる凸型であり、導水可能範囲も  $-1.0 < hc/H < 2.0$  程度と現地計測と同様の傾向を示している。

### 3.3.3 導水量の比較

室内水理模型実験と現地計測における導水流速値の絶対値について、導水流速が最大を示す越波版天端高と水面位置が等しい条件で比較を行った。ただし、現地では常に潮位が変動しているため、越波版天端水深  $hc$  が  $\pm 0.1 \text{ m}$  以内

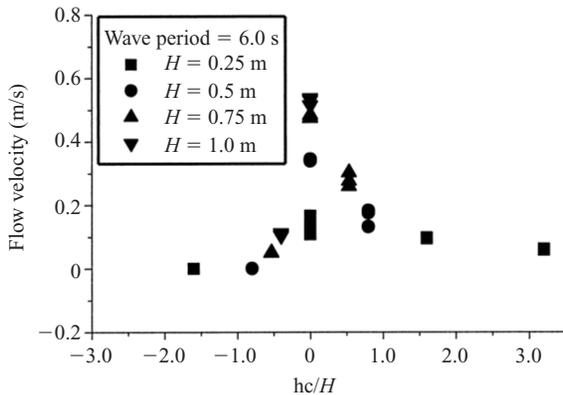


Fig. 10 Relation between flow velocity and water surface elevation (Result of experiment)

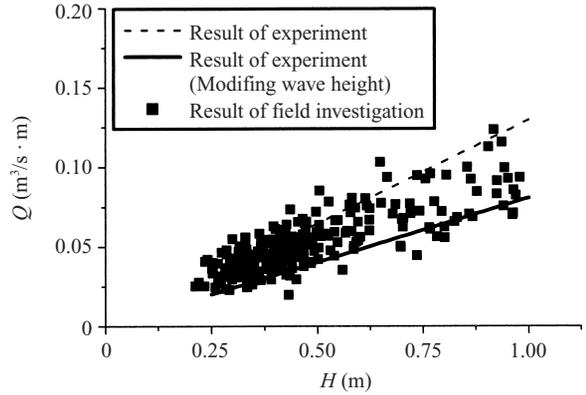


Fig. 11 Comparison of inflowing water between experiment and result of field investigation

となる計測データを抽出した。また、水理実験条件にあわせるために、有義波高  $0.2 \text{ m} \sim 1.0 \text{ m}$  の計測データを用いた。Fig. 11 に、水理実験結果(図中破線)と抽出した現地計測結果をあわせて示す。なお、導水管サイズと導水管設置間隔が現地と水理実験で異なるため、防波堤法線方向に対する単位幅導水流量 (= 導水管断面積  $\times$  導水流速  $\div$  導水管設置間隔) に換算して図示した。また、今回の計測期間では周期  $4.0 \text{ s} \sim 8.0 \text{ s}$  が多いため、水理実験結果は周期  $6.0 \text{ s}$  のデータを用いている。その結果、水理実験結果は現地計測結果の上限を与えるような結果となっている。これは、現地在不規則波で、実験が規則波であることの相違の影響である。不規則波(有義波高)と規則波(平均波高)の間には、統計的に有義波高  $= 1.6 \times$  平均波高の関係があるため、この式で水理実験結果を修正すると(Fig. 11 の実線)、実験値は現地計測結果の下限を与えていることが分かる。現地計測は、さまざまな不確定要因があるため、実験結果とまったく同じ結果を得ることは難しいが、今回の現地計測結果は、おおむね水理模型実験結果と合致していた。

## 4. 海水交換型防波堤の効果

3章で述べたように、本稿で取り上げた海水交換型ハイブリッドケーソンは低波浪時にも十分導水性能を有していることが実証されたが、港内全体の海水交換の状況については、数値シミュレーションによる検討が有効である。

Fig. 12 に示すモデル港湾に対して、海水交換型防波堤の有無による港内水塊の流動の数値シミュレーションを行った。計算は、浅海長波方程式による二次元単層モデルを適用し、差分法で解いた。初期状態として、港内の濃度を 100、港外を 0 とし、計算領域の境界部分に  $0.2 \text{ m}$  の潮汐を与え、海水交換型防波堤部分に導水流量を与えている。ここで用いた導水流量は、有義波高  $0.25 \text{ m}$  に対して現地計測結果の近似式から算定した。計算結果の一例を Fig. 13 に示す。海水交換型防波堤が設置されない場合、4 潮汐(2 日)経過後も港内の濃度はほとんど変化がない。一

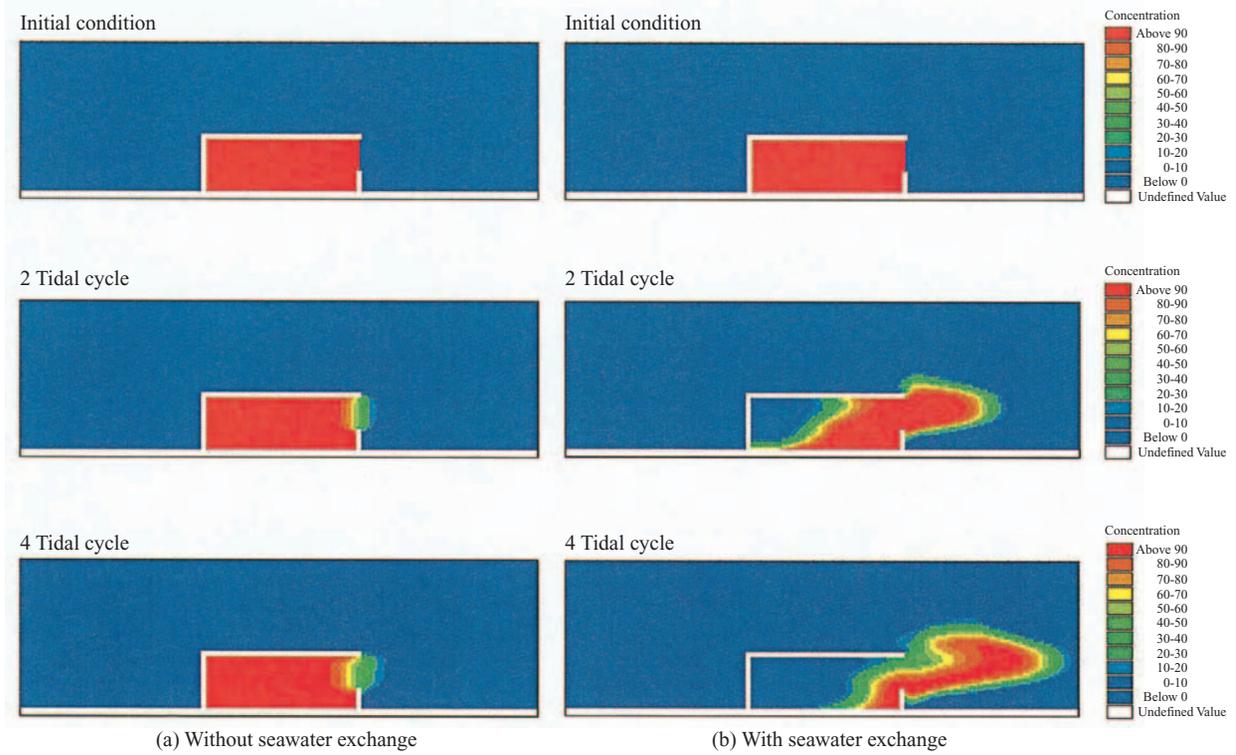


Fig. 13 Result of numerical simulation

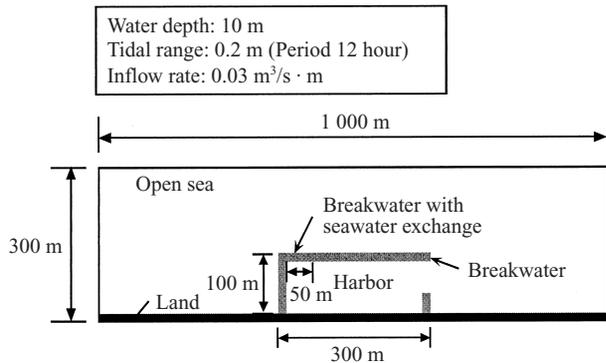


Fig. 12 Model port

方、海水交換型防波堤が設置された場合には、外海水が港内へ導水されるため、港奥から港口方向への流れが生じ、港内の濃度が大幅に低下している。このように、海水交換型防波堤を設置することで、港内の海水交換が飛躍的に促進されることが分かる。

## 5. おわりに

神奈川県三崎漁港における海水交換型ハイブリッドケーソンの導水量の現地計測によって、これまで室内水理模型実験レベルで把握していた導水性能が、現地でも発揮されていることが確認できた。環境問題に対する意識が高まる中、本構造は、港内の水質環境保全に大きな役割を果たす

ことができるものと確信している。

現地計測を行うにあたって、神奈川県東部漁港事務所の皆様には、波浪、潮位データの提供を受け、さまざまなご配慮をいただきました。ここに、感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 高橋重雄. “新構造防波堤とその設計” 水工学に関する夏期研修会講義集 B コース. 土木学会海岸工学委員会. 1997. p. 1-20.
- 2) 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. vol. 43, 1996, p. 1226-1230.
- 3) 塩崎禎郎, 本田秀樹, 堀内博, 中村宏. 海水交換機能を有する直立消波ケーソンの開発～高波浪域への適用に向けて～. 海洋開発論文集. vol. 16, 2000, p. 481-486.
- 4) 本田秀樹, 塩崎禎郎, 堀内博, 森本悟司. 海水交換型防波堤の現地導水量計測. 海洋開発論文集. vol. 20, 2004, p. 353-358.



塩崎 禎郎



本田 秀樹



堀内 博