

実海域を想定した港内水排出式海水交換防波堤 の効果に関する模擬港湾実験

PERFORMANCE OF A WATER EXCHANGE BREAKWATER OF DISCHARGE
TYPE IN A MODEL HARBOR OF REAL SITE

河野徹¹・中村孝幸²・浅川典敬³・大川大一³

Toru KONO, Takayuki NAKAMURA, Noritaka ASAKAWA and Taiichi OKAWA

¹正会員 (財) 災害科学研究所 研究員 (〒530-0005 大阪市北区中之島三丁目2-4大坂朝日ビル)

²正会員 工博 愛媛大学准教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

³正会員 工修 (財) 漁港漁場漁村技術研究所 第1調査研究部長 (〒101-0047 東京都千代田区内神田
1-14-10)

³(財) 漁港漁場漁村技術研究所 主任研究員 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-14-10)

Sea water pollution in a fishery harbor is one of serious problems in fishery industries. Safety of sea foods is heavily dependent upon the quality of sea water in a harbor and its neighboring sea area. On the other hand, since a fishery harbor is a base for fishing boats and vessels, the tranquility of a harbor basin must be securely controlled by the surrounding breakwater system. In order to solve the above mentioned contradictory problems of the fishery harbor, we have proposed and developed a new type of sea water exchange breakwater, which has a wave control function as well as water exchange function. In this study, performance of the newly developed water exchange breakwater in the model harbor basin was examined extensively, such as a water exchange function and wave sheltering effect for various water-exchange breakwater allocations. It was confirmed that five water exchange breakwaters were sufficient to exchange sea water in the model basin for given nominal wave conditions.

Key Words: *Water exchange breakwater, model harbor, circulating flow, wave sheltering, breakwater allocation, water exchange amount*

1. はじめに

四方を海に囲まれた、わが国は古くから天然の地勢(島嶼・岬など)や人工構造物の防波堤などにより風浪を防いで船が安全に停泊することのできる水域を確保してきた。その水域は水産業の生産活動の場として、水陸交通の結節点として利用されている。

特に漁港は漁業生産活動の場として、生活の場として利用されてきている為、家庭排水、漁業処理雑排水などの処理水が流入している。

近年は漁港の港内の水質が悪化して活魚の蓄用の支障、漁港周辺への影響が始め水産資源の再生産を阻害する要因となってきた。防波堤による進入波を出来るだけ低減させ、多量の海水交換を図るという、一見合い矛盾したことが要求されている。

それに対処するため著者ら¹⁾は防波堤の前面に遊水室を設けその下部に通水工を設けた、海水交換防波堤を提案してきた。本防波堤構造は従来の海水交

換防波堤と同様に波エネルギーを利用するが、通水工部の流れの方向は従来の越流型と逆方向であり、港内水を港外に排出する機能を有する。

従来において提案されている海水交換防波堤のほとんどが越流タイプであり、このタイプでは、潮位と越流堰、或は潜堤の天端の位置関係により、海水導入量が大きく増減する²⁾。今回提案する防波堤は、海水交換量が潮位変化にほとんど影響されないという特長がある。

本稿では実海域の漁港を想定して、平面模型実験に基づき、港内水の交換に効果的な海水交換防波堤の平面的な配置を検討すると同時に、最終的に決定された海水交換防波堤の配置に対する港内波浪の静穏化効果などについても検討を行ったので報告する。

2. 実験水槽と実験方法

(1) 平面水槽

本実験には、(独)水産総合研究センター水産工
学研究所の平面波流水槽を用いた。この水槽は、長
さ35m、幅20m、高さ1mの規模で、一端には多方向ピ
ストン型造波装置が、他端には端部からの再反射を
防ぐために捨石とプラスチック製網状構造材からなる
消波工が設けてある。

この平面水槽で再現した現地海域は、図-1に示
すように、ほぼ500m×830mの領域に相当する。この
とき波向きは、造波板の垂直方向（造波方向に相
当）が現地で西北西（WNW）である。想定した模型
の縮尺は、 $S=1/24$ とした。

(2) 港湾模型

実験で再現した港湾域および防波堤を含む陸域境
界を図-2に示す。図-1との比較から推定されるよ
うに、隣接する既存の港は、平面水槽の規模から制
限を受けるため、部分的に再現する。但し計画の西
防波堤および沖防波堤はほぼ全て再現した。

港奥側の岸壁は、現地において直立護岸構造であ
るため、ベニヤ板を衝立構造で構成して近似した。

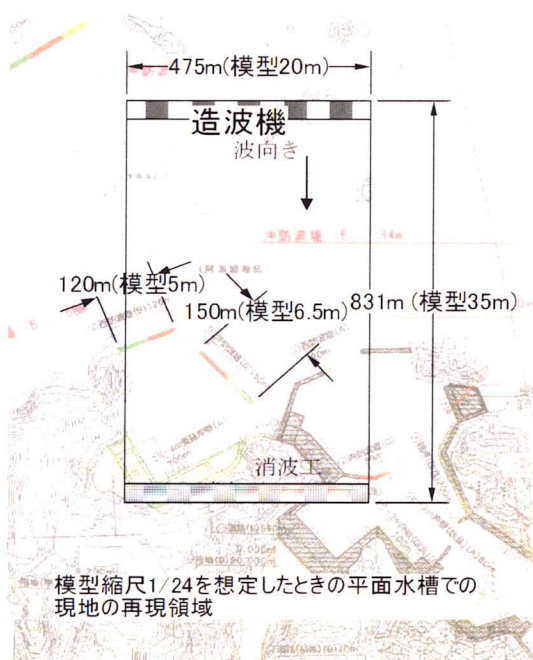


図-1 平面水槽で再現した現地海域

港内の一部の境界は、水槽の側壁に対応させてい
るが、この境界は現地では浅瀬を含む岩礁になっ
ていることから碎波が生じ、この境界からの反射波が
小さいものと想定して、直立壁前面に消波材（一枚
の消波材厚さ10cm）を3枚重ねて低反射構造とした。
また、隣接する既存の港側の境界についても、やは
り現地では一部が岩礁海岸で浅瀬になっていること
から、低反射構造の消波材付き直立壁で近似した。

一方、西防波堤と沖防波堤については、海水交換

防波堤を一部に設置した防波堤構造とした。

防波堤、波除堤などの配置の組み合わせをまとめ
て記載したものが図-2である。

海水交換防波堤の1基の長さは、模型量で
0.4m(現地量で9.6m)とし、最大で西防波堤には2基
を、沖防波堤には5基を設置した。実験では、比較
のため、これら防波堤の両者あるいは一方を不透過
性防波堤とした検討も行っている。

表-1は、本実験で用いた防波堤の構造および配
置条件を一括して示す。表中には波条件、特に規則
波および不規則波の区別ができるようにした。

表-1 平面港湾模型実験のケースとその概要

ケース	規則波or 不規則波	海水交換 防波堤設 置の有無	海水交換防波堤 の位置と基数
1	規則波	有り	沖防波堤に5基
2	不規則波	有り	沖防波堤に5基
3	不規則波	無し	沖防波堤に5基と 西防波堤に2基
4	不規則波	有り	—
5	不規則波	有り	沖防波堤に5基と 波除堤

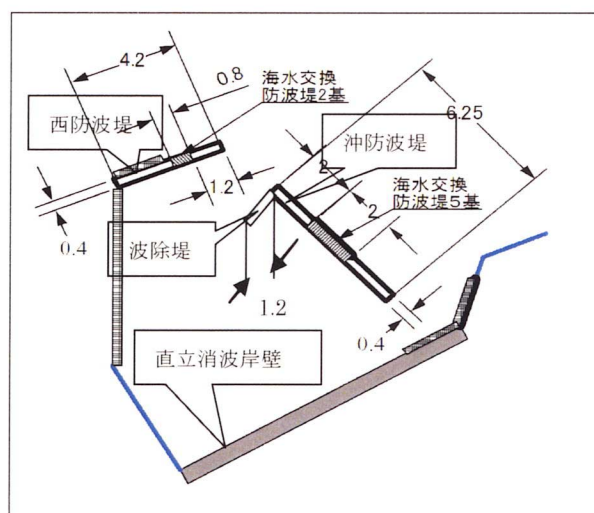


図-2 平面実験の構造および配置条件 単位 (m)

(3) 模型の防波堤

模型防波堤には、図-3に示す遊水室型海水交換
防波堤と不透過堤の2種類を用いた。この遊水室型
防波堤は、後述3. (1)で実施した断面2次元実験で
使用した模型とほぼ同形状である。

水槽内への設置に当たっては、遊水室型堤体の
下部に床版ブロックを積み重ねて、所要の天端高さ
が確保できるようにした。

いずれの堤体も、法線方向の幅は40cmであり、不
透過堤群の間に海水交換防波堤がちょうど収まるよ

うに配置した。

また、実験で試験的に波を作用させた時、特に長周期・大波高の消波対象波に対しては、堤上を越波する状況が観測された。本実験では海水交換防波堤の通水部からの海水交換、透過波を確認する事になるため、以後全ての実験ケースでは越波が生じないようにコンクリート製の立方体ブロックを堤上に付加して天端をかさ上げた。

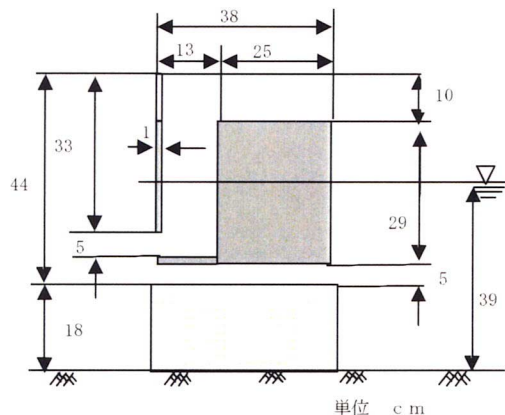


図-3 海水交換防波堤の断面

(4) 計測装置と実験方法

実験は測定項目に着目して、下記の2種類を実施した。①海水交換防波堤による港内の海水交換の状況に関する観測実験、②海水交換防波堤を用いるときの港内静穏度の把握実験である。以下これらの二つに実験の各々に分けて説明する。

(a) 海水交換実験

港内における海水交換の状況は、主として初期状態において港内に閉じこめた濁度の希釈状況の時間的な変化を観測することで実施した。

この初期状態の港内の様子を写真-1に示す。

白色濁度は、まずカオリン粘土を水で薄めた溶液を作り、これに界面活性剤を適量だけ加えて原溶液とした。この原溶液を港内水と強制的に混合させて濁度の初期状態とした。港内の濁度は、ほぼ一様となるように人為的によく攪拌した。このとき濁度の混合状態は計5台の濁度計でモニターしながら行った。この実験で用いた計測装置は図-4に示すように配置した。

これら#2～#4の計測装置のセンサー部は、水深39cmのほぼ中央位置に来るように設置した。ただし、海水交換防波堤の通水部に設置した電磁流速計は、通水部の中央位置にセンサー部が来るように設置した。流速計の流速に対して通水部の面積を乗じて、海水交換防波堤の通水量とした。

これら電氣的な計測に加え、実験ではビデオカメラにより、港内の白色濁度の希釈状況や球形トレーサの移動状況を撮影して、視覚的に海水交換の状

況が判定できるようにした。

(b) 静穏度検討

実験では港内外の波高を測定して、特に港内静穏度に及ぼす海水交換防波堤の透過部分の存在の影響について検討した。

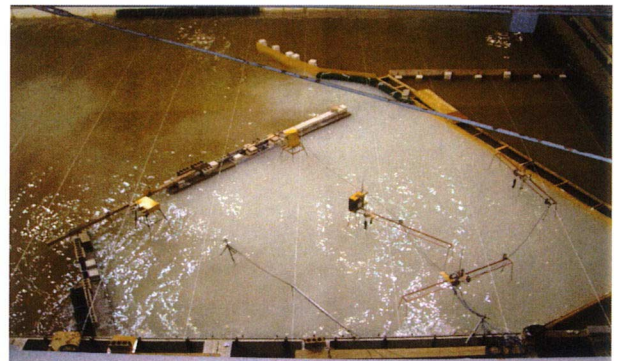


写真-1 港内の海水交換の状況を観測するために用いた白色濁度とその初期状態

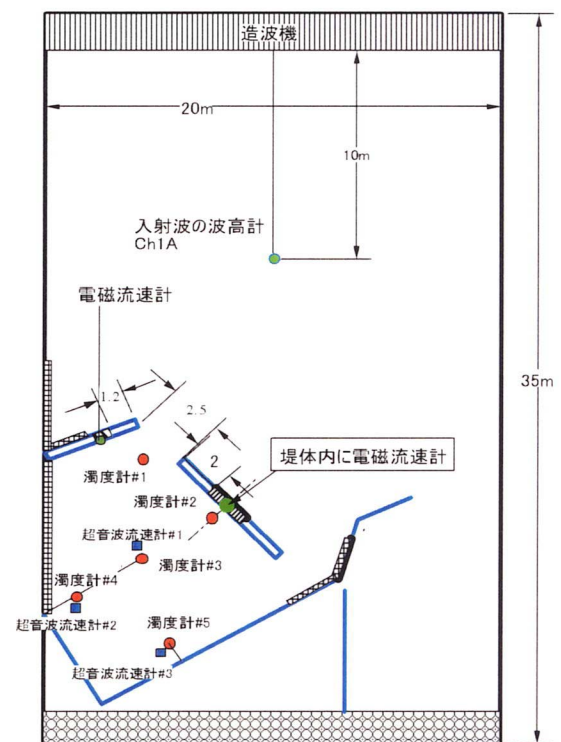


図-4 海水交換実験に用いた計測器と配置

このため図-5に示すように、港奥の一方の埠頭に平行に13台の波高計を80cmの間隔で観測台車に固定配置した後、観測台車を順次移動させて、計9測線において平面的な波高分布を測定した。このときの観測台車の移動間隔は1.6mとした。なお入射波は海水交換実験の状況を示す図-4の場合と同様に、造波板より10mの位置に波高計を固定して観測した。

(5) 実験方法

(a) 海水交換

海水交換の実験は、主に上記した白色濁度の希釈度合を濁度計により測定することで実施した。本

実験の港湾モデルでは、港内水の容量と設置した海水交換防波堤の基数から推定される交換必要時間がほぼ4時間程度と概算された。この時1基当たりの海水交換量は断面2次元実験の結果を用いた。

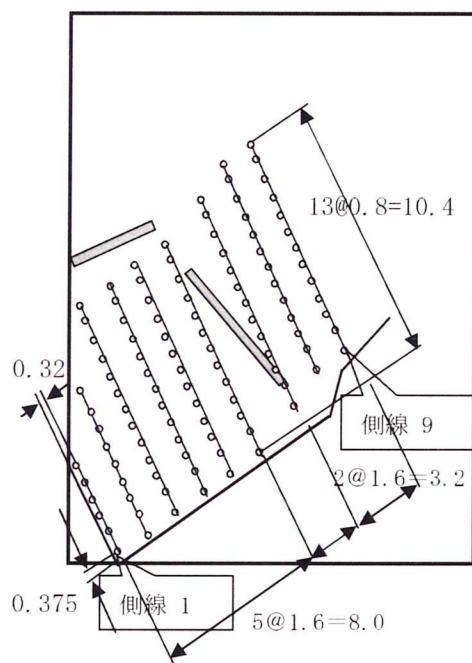


図-5 水槽内での波高計の配置状況(単位 m)

必要とされる交換時間が4時間程度のオーダーであることから、一つの波条件に対する濁度の希釈実験は、その半分程度の2時間の継続的な計測が最低限必要と判断した。本実験では港内の海水交換の状況の観測時間は、一つの波条件について2時間に限定した。この測定時間は、現地量（長さのスケールで24倍）に換算すると、約10時間に相当する。

実験では、最初に海水交換防波堤の通水部や港の港口部などの開放部分に木製の蓋を取り付けた後に、上記した白色濁度を投入し、十分に攪拌してから、濁度計の初期濃度や流速計の初期0点を記録した。この状態で所要の波条件の波を作用させ、先頭の波が港湾モデルに到達すると同時に、開放部分の蓋を取り外し、計測を開始した。このとき、水槽の上部に固定したビデオカメラによる港内外の流況の撮影も開始した。

(b) 静穏度検討

波の作用時間は、実験波が不規則波であることから各測線での波高測定に対して各々6分間とした。各測線での波高測定が終わると、造波機を止めた後に波高計群を次の所定の測線まで移動し、同じ不規則波を作用させて当該測線での波高測定を実施した。この作業を繰り返すことで、全測線の波高測定を行った。

(5) 作用波の条件

(a)

海水交換

この実験で用いた波条件は、現地での通常波浪に対応するものとした。これは、海水交換が主に通常波浪時に行われることが要求されているためである。用いた波条件を現地波条件と合わせて表-2に示す。なお、水深条件は全てのケースで平均潮位の際の水深に対応する $h=39\text{cm}$ と一定にした。

表-2 実験に用いた波条件

ケース	模型波の周期と波高		現地換算波の周期と波高		備考
	周期 $T(\text{s})$	波高 $H(\text{cm})$	周期 $T(\text{s})$	波高 $H(\text{m})$	
1	0.95	5.0	4.7	1.2	通常波
2	0.93	5.5	4.5	1.3	通常波
3	0.92	6.1	4.5	1.5	通常波
4	0.91	5.6	4.5	1.3	通常波
5	0.91	5.7	4.5	1.4	通常波

(b) 港内静穏度の検討

この実験で用いた波条件を一括して表-3に示す。表に見られるように、波高分布の測定実験では、常時波浪と消波対象波の2種類の条件を用いた。表中には対象とした防波堤の構造条件についても併せ示す。

表-3 波高分布の測定に用いた波条件と堤体条件

ケース	規則波か 不規則波	海水交換防 波堤の設置 の有無	海水交換防波堤 のときの設置位置	模型波の周期と波高		現地換算波の周期と波高		備考
				周期 $T_{1/2}(\text{s})$	波高 $H_{1/2}(\text{cm})$	周期 $T_{1/2}(\text{s})$	波高 $H_{1/2}(\text{m})$	
7	不規則波	無し		1.41	11.3	6.9	2.7	消波対象波
8	不規則波	無し		0.93	6.5	4.5	1.6	通常波浪
9	不規則波	有り	沖防波堤Bに5基	0.91	5.7	4.5	1.4	通常波浪
10	不規則波	有り	沖防波堤Bに5基	1.42	10.3	6.9	2.5	消波対象波
11	不規則波	有り	沖防波堤Bに5基と 西防波堤Bに2基	0.91	5.6	4.5	1.3	通常波浪 港内のみを測定
12	不規則波	有り	沖防波堤Bに5基と 西防波堤Bに2基	1.42	10.4	7.0	2.5	消波対象波 港内のみを測定

3. 実験結果

(1) 断面2次元実験

平面実験に先立って、実験に使用する模型の機能を長水路2次元水槽で検討した。その結果を現地波条件に換算して図-6～8に示す。これらは、反射率 C_r 、透過率 C_t 、平均通水量 Q の結果に相当する。図中には、不規則波に対する結果および減衰波理論³⁾による理論算定結果についても併せ示した。これらの図より、反射率および透過率の実験結果は、ほぼ理論算定結果に一致することや、不規則波では透過率の結果に見られるように、多少ながら増加傾

向にあることが分かる。これはやはり各種の周期成分を含むことの影響によるものと考えられる。

海水交換量は、防波堤の単位幅当たりで、一波当たりの平均通水量 Q を進行波による半周期間の移動水塊量($HL/2\pi$)で除した無次元通水量 Q^* で表示してある。図中に見られるように、通水量が負値であるのは、冲向きへの輸送流量であることを示す。この Q^* は、反射率が低下する波周期よりも長周期側で $Q^*=-0.3$ 程度と有意な大きさを示す。不規則波に対して長周期側で Q^* が低下する傾向が見られるが、これは平均通水量 Q の無次元化に当たり、有義波の諸元を用いていることによるものと考えられる。

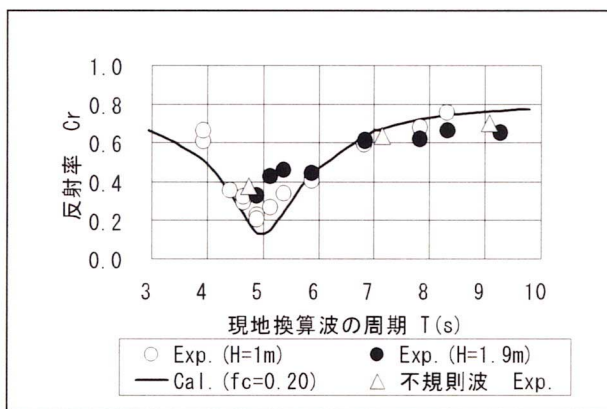


図-6 2次元実験による反射率 C_r

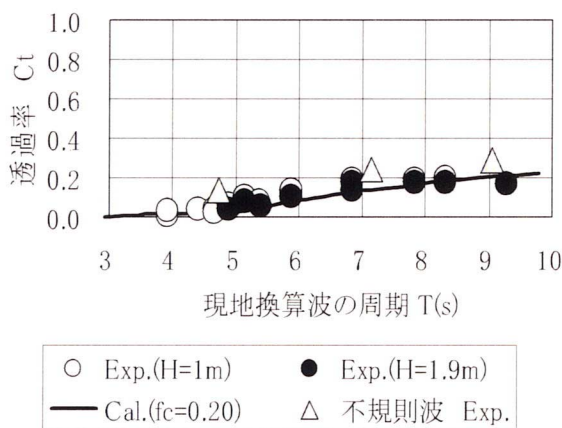


図-7 2次元実験による透過率 C_t

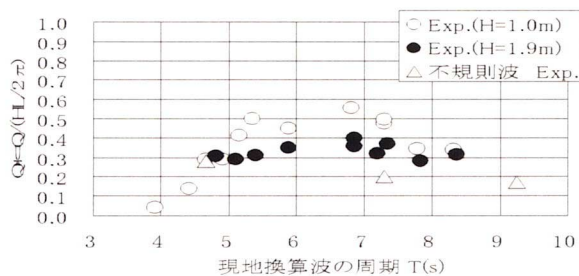


図-8 遊水室型海水交換防波堤による平均通水量

(2) 海水交換

図-9～12は、港内に投入した濁度の希釈度合の時間変化を現地量で示す。図中では、各時間での濁度の濃度を造波開始時の初期濃度 C_0 で除した無次元濃度で示す。

港内濁度の希釈が最も遅いのは海水交換防波堤を設けないケースである。港内域全体が一様に希釈されるケースは、沖防波堤に海水交換防波堤を設け、さらに波除堤を付加した図-12に示すケースある。

図-9の沖防波堤にのみ海水交換防波堤を設けた場合、港奥左#4の濁度の低下が不十分であるが、これは左右二つの港口部から流入した外海水が港奥左に設けた濁度計付近で衝突して滞留する傾向が見られており、この影響によるものと考えられる。又、図-10に示すように、沖防波堤と西防波堤の両者に海水交換防波堤を設けると、湾奥左右の両者で濁度が低下するように改善されることが認められる。

図-12は、上記で示した各防波堤の構造条件に対する濁度の港内平均の時間変化を示す。数値的に最も港内平均濁度の低下が著しいのは、やはり沖防波堤に5基の海水交換防波堤を設けてさらに波除堤を付加したケース5である。港内平均濁度という観点から見ると、沖防波堤と西防波堤の両者に海水交換防波堤を設けても、沖防波堤のみに海水交換防波堤を設ける場合と濁度の低下度合にはほとんど差異が認められないことも分かる。

次に図-13は、沖防波堤に海水交換防波堤を設けた時、および西防波堤にもそれを設けた時に、その通水部で測定した平均流速から求めた海水交換量の結果を示す。図中には、上記の断面2次元実験で検討した結果についても併せ示す。

この図より、沖防波堤あるいは西防波堤のどちらでも、海水交換防波堤の通水部では、ほぼ断面2次元実験による結果とほぼ同じ程度の海水交換量が出現しており、2次元と3次元の実験による海水交換量の差異はほとんどないことが確認できる。

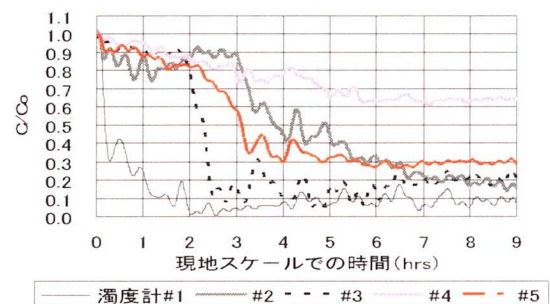


図-9 海水交換防波堤を沖防波堤に5基設けた時の港内濁度の時間変化(ケース2) $T_{1/3}=4.5s$, $H_{1/3}=1.3m$

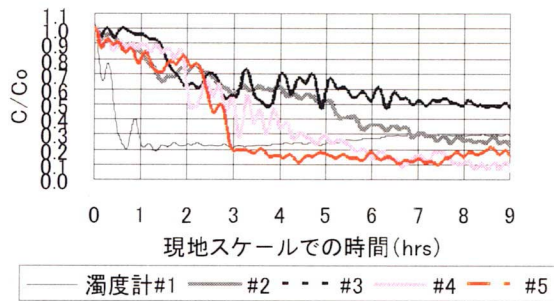


図-10 海水交換防波堤を西防波堤に2基、沖防波堤に5基設けた時の港内濁度の時間変化(ケース4)
 $T_{1/3}=4.5s$, $H_{1/3}=1.3m$

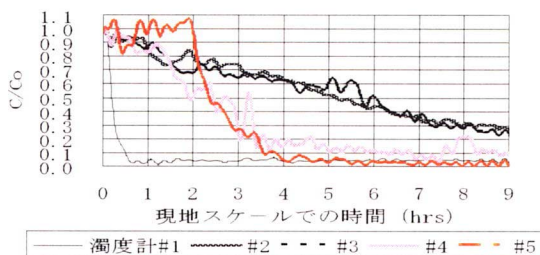


図-11 海水交換防波堤を沖防波堤に5基設け、更に波除堤を設置した時の港内濁度の時間変化(ケース5)
 $T_{1/3}=4.5s$, $H_{1/3}=1.4m$

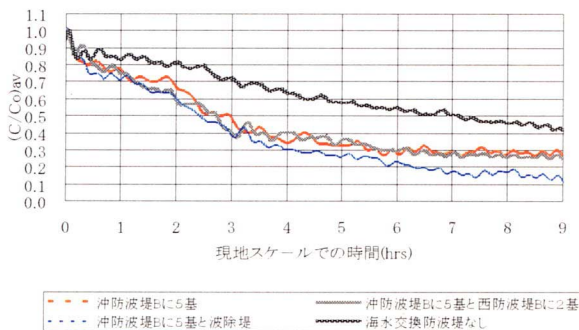


図-12 構造条件別の港内濁度の時間変化

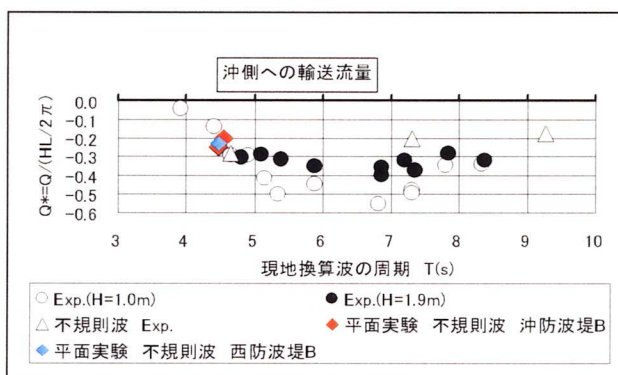


図-13 海水交換防波堤による平均通水量

(3) 静穏度検討

海水交換防波堤の有無と配置を示す表-3 の 6 ケースについて実験を行い、9 測線の波高を測定した。代表例として、消波対象波におけるケース 10 の湾奥部での測線 1 の測定値と解析値を図-14 に示す。実験での計測値と解析値は比較的一致していることが認められる。

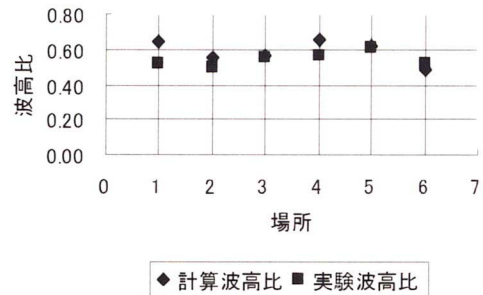


図-14 波高分布の比較 測線 1 (ケース10)

4. 結語

- ・通水孔を通過する流量は今まで¹⁾の2次元実験、平面実験で確認されている量と大差ない量である。
- ・港内平均海水交換率は沖防波堤にのみ海水交換防波堤を設けた場合と西防波堤と両方に設けた場合を比べると港内の平均海水交換率は大差ない。

謝辞：

本実験は沿岸新技術研究会が開発した港内水排出型海水交換防波堤の機能実験の成果内容の一部であります。本工法の実験・検討に当たり、長崎県、(財)漁港漁場漁村技術研究所、その他、多数の関係者にお世話になりました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中村孝幸、大村智宏、楨本一徳、大井邦昭：波による渦流れを利用する遊水室型海水交換防波堤の効果的な断面について、海洋開発論文集、第21巻、pp. 541-546, 2005.
- 2) 森口朗彦、藤原正幸、山本正昭、田中輝男：潜堤付孔空き防波堤の実海域での導水特性と泊地内水循環予測、海岸工学論文集、第39巻、pp886-890, 1992.
- 3) 中村孝幸・井手善彦：波の逸散現象を利用した隅角物体まわりの波変形と作用波力の算定法：海洋開発論文集、第13巻、pp177-182, 1997.