

渦流制御を利用する海水交換促進型防波堤の 平面波浪場における効果について

EFFECTIVENESS OF A VORTEX-INDUCED TYPE WATER EXCHANGE BREAKWATER IN HARBORS

大村智宏¹・中村孝幸²・大井邦昭³・高橋通夫⁴

Yoshihiro OHMURA, Takayuki NAKAMURA, Kuniaki OOI and Michio TAKAHASHI

¹正会員 独立行政法人水産総合研究センター 水産工学研究所水産土木工学部
(〒314-0421 茨城県鹿島郡波崎町海老台)

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

³学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

⁴学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Seawater exchange breakwaters may be useful to keep the water quality and also to maintain the seabed condition in a harbor. We have already presented a new type of seawater exchange breakwater, which is able to induce outgoing mean current to the offshore by the wave excited vortex motion in the breakwater. In this study, we examine the effectiveness of the breakwater in harbors, such as wave sheltering effects and water exchange abilities. Two different harbor models are adopted to test the effectiveness of the breakwater. Performance of the breakwater in the harbor is also compared to the previous two dimensional results in the vertical plane. It is seen that the new breakwater is effective in harbors in the same way as the two dimensional wave field.

Key Words: *Vortex induced current, water exchange, wave sheltering effect, harbor model test, piston mode wave resonance, numerical simulation*

1. はじめに

一般に港湾や漁港は、厳しい波浪環境下にある場合が多く、防波堤など外郭施設の整備により、船舶・漁船の接岸や荷役に対して安全ように港内の静穏化が求められる。しかし、静穏度を求めるあまり、港内外の海水交流が抑止され、水質悪化が問題になっている。その対策として古くから透過性防波堤の適用や、最近においてはより積極的に海水交換促進型の防波堤の開発も進められている。開発に当たっては、特に本来の防波施設としての機能である来襲波の遮断および反射波の低減などをできるだけ維持して、海水交換が有効に行える構造体を究明することが必要になる。

既に著者ら^{1),2)}はこのような海水交換型防波堤として異吃水の2重壁式構造を基本構造とするいくつかの海水交換型防波堤を提案し、その波浪制御効果や平均流を生成する機構とその効果について一部報告した。その際、遊水室内下部に没水平版を設けて通水路を設ける工法は、波浪制御効果と平均流の生成に有効であることを示した。そこ

で本研究では、港湾の平面形状を考慮した3次元的な考察を行うことを目的とする。具体的には、港湾の外郭施設としての防波堤の列に海水交換促進型防波堤を設置したモデル港湾を想定し、水理実験に基づき、以下の項目について検討を行う。

- ① 港湾の外郭施設としての波浪制御効果について
- ② 海水交換特性の定量的な把握について
- ③ 港内外また港口部を含めた港湾域全体の流況特性について

特に、③については堤体列に海水交換促進型防波堤を用いた場合と不透過堤を用いた場合の流況の比較や、数値計算を用いた検討などの結果から考察を行う。

2. 実験装置および実験方法

(1) 模型港湾と実験条件

水理模型実験は、独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所の波浪平面水槽実験棟の一部(長さ28.0m×幅10.0m×高さ1.0m)を用いた。

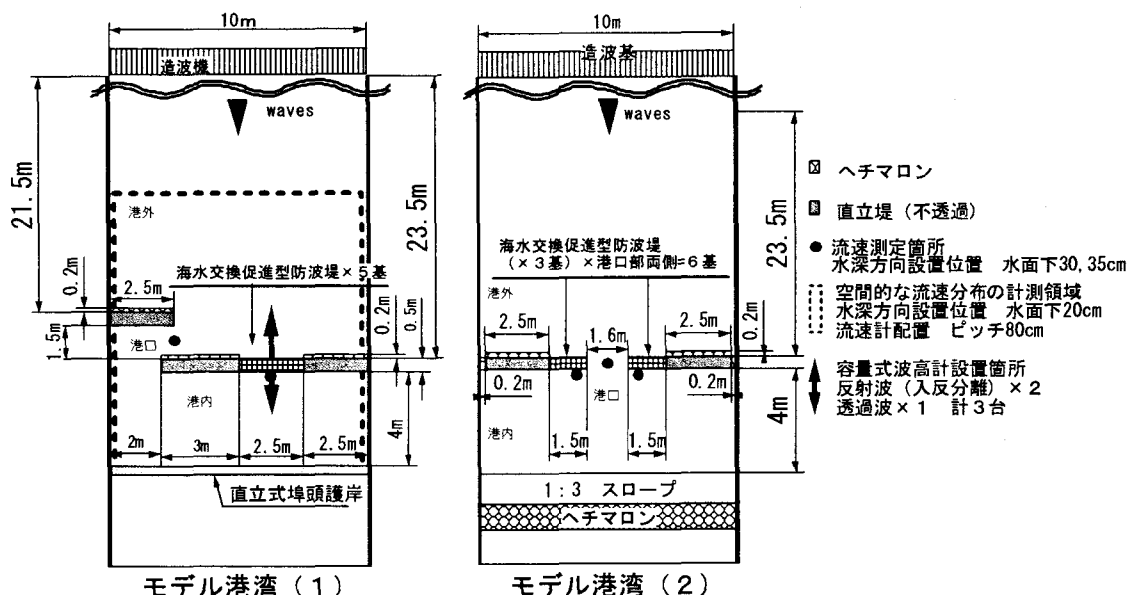


図-1 平面実験で用いたモデル港湾

モデル港湾は、図-1に示す2種類のものを用いた。図中のモデル港湾(1)は港内泊地の閉鎖性が強い形状を想定し、港内およびその周辺の循環流の特性を把握するために用いた。後述する海水交換防波堤は、図中に示す位置に全部で5基(ユニット長0.5m)を設置した。また、モデル港湾(2)は中央部に港口部を持つ比較的簡単な矩形港湾を想定し、港口部の両側にそれぞれ3基ずつの海水交換防波堤ユニットを設けた。これは、港口部に冲向きの平均流を誘引することを目的としており、このような平均流が誘引されれば、港内埋没の有効な対策法になると考えられる。なお、ここで想定した模型の縮尺は1/20程度である。

実験に用いた入射目標波は、比較が容易となるように、以前の断面2次元実験¹⁾で用いたものの中から選定した。また、設置水深 h も同様に40cmに固定した。

選定した波条件を一括して表-1に示す。表中には、波高Hと周期Tに加え波長Lおよび周期に関する無次元量として用いた波長と遊水室幅の比L/Bの値も付記してある。なお、選定した波周期の条件下(T=1.4~1.9s)において、以前の断面2次元実験の結果¹⁾では、透過率が0.3程度以下、反射率が1.4sの条件で極小値0.2程度を示し、他の条件で0.3から0.5の値を示すことが判明している。また、平均輸送流量は、T=1.4sより長周期側に移行するにつれて増大することなども判明しており、このような成果を参照して上記の波条件を選定した。

(2) 模型堤体

海水交換促進型防波堤には、図-2に示す没水平板を有する垂下版構造の堤体を採用した。この堤体では、遊水室背後に耐波安定性を増すため、遊水室幅とほぼ同幅の重量部が設けてある。

表-1 波条件

周期T(s)	目標波高H(cm)	Hin(cm)	波長L(cm)	L/B
モデル港湾(1)				
1.4	10	11.2	239	9.6
1.8	10	9.1	327	13.1
1.8	5	6.9	327	13.1
モデル港湾(1)堤体列を全て直立堤とした場合				
1.8	10	7.6	327	13.1
モデル港湾(2)				
1.8	10	12.5	327	13.1
1.9	10	10.3	359	14.3

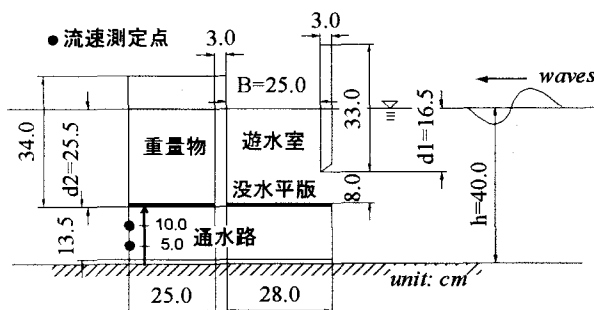


図-2 模型の構造諸元 (断面図)

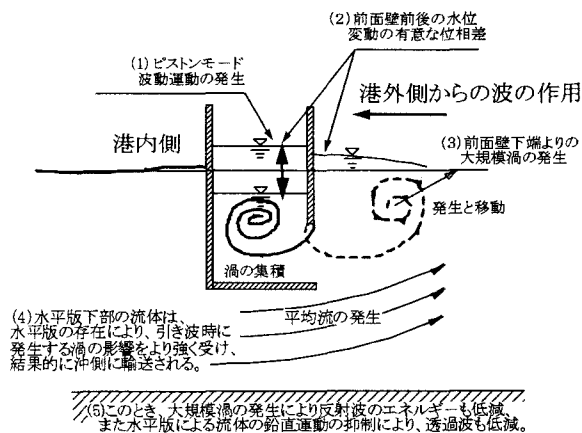


図-3 平均流生成およびエネルギー逸散機構

実験では、原則として重量部付きの堤体を用いたが、比較のためこの重量部を取り外した模型も一部用いた。

この堤体の特色は、図-3に概略的に示すように、ピストンモード波動運動により生じる渦流の影響を一方のみに制御することで通水路の流体を冲向きへ引き出す機構を有すること、このとき同時に透過・反射波についても渦流れの生成により大幅に低減する機能も併せ持つことである。

また、模型堤体としては、比較のため、不透直立堤も用いたが、これは上記した堤体の前後に鉛直板を取り付けることで実現した。

(2) 実験方法

実験では、模型港湾域の流れが定常状態になると推定される造波開始15分の経過後に流速測定および波変形の測定を行った。

a) 擬似断面2次元測定実験

波変形の測定は、図-1に示すように、海水交換防波堤列の中央部に位置する堤体を対象にして実施した。測定には反射波測定用に2台、透過波測定用に1台の計3台の容量式波高計を使用した。

流速の測定には電磁流速計を使用した。海水交換防波堤の通水量の測定実験では、通水部が水底よりほぼ15cmの範囲内にあることから、図-2に示すように通水部を対象にした2測点に電磁流速計を設置した。このとき、測定対象ユニットは、やはり堤体列の中央部のものとした。モデル港湾(1)の実験では、港口部での流速測定も実施したが、このとき港口部断面を等面積に分割する計6点に流速計を設置して流速を測定した。

b) 平面的な流況について

平面的な流況を把握するため、直径約7cmのゴムボール(計25個)をトレーサーとして用い、水槽の鉛直上方に設置したビデオカメラで撮影して流況を解析した。また、図-1に示す測定領域内に格子状(0.8mピッチ)に配置した測点を対象にして電磁流速計により空間的な流速分布を測定した。このとき、流速計の水深方向の設置位置は水面下20cmとほぼ水深の中央部とした。

3. 数値計算法の概要

(1) 2次元的な波変形の算定

本研究では垂下版式防波堤による波変形の算定には、中村・井出³⁾により展開されている線形ポテンシャル波動理論に基づく減衰波理論を用いた。この算定法は、カーテン防波堤など隅角部を有する構造物を対象として、鋭角部よりの流れの剥離や渦流れの発生現象によるエネルギー逸散を近似的に考慮する方法で、線形減衰を仮定した流体を想定している。ここで、線形抵抗係数には従来の研究¹⁾を参照して0.2を用いた。

(2) 波高分布および海浜流の算定

モデル港湾における波高分布と海浜流の算定には、非定常緩勾配方程式⁴⁾を用いた。算定では、まず海水交換防波堤の反射・透過特性を考慮して平面的な波高計算を行い、これに基づきラディエーションストレス(過剰運動量フラックス)を起因力とする海浜流を求めた。そして、海水交換防波堤による冲向き平均流を入力として、港湾域の流れ場の算定についても行い、上記の海浜流と

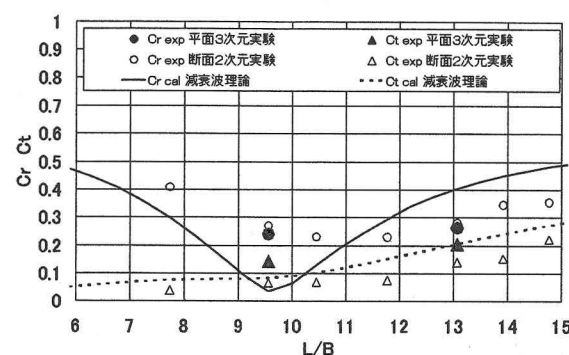
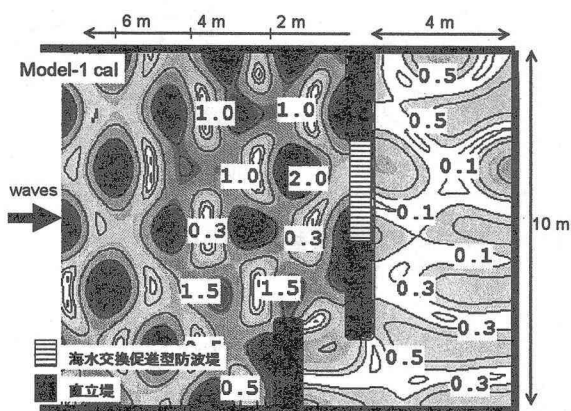
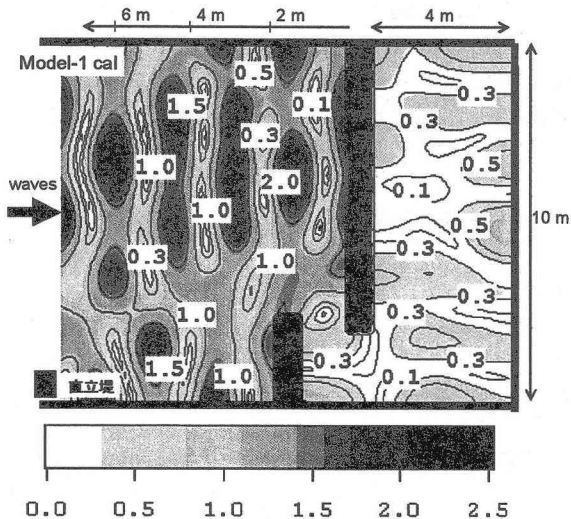


図-4 海水交換促進型防波堤の反射率および透過率



(a) 堤体列に海水交換促進型防波堤を設置した場合



(b) 堤体列を全て直立堤(不透透)とした場合

図-5 非定常緩勾配方程式による港湾域の波高分布(入射波で除した波高比 $L/B=13.0$)

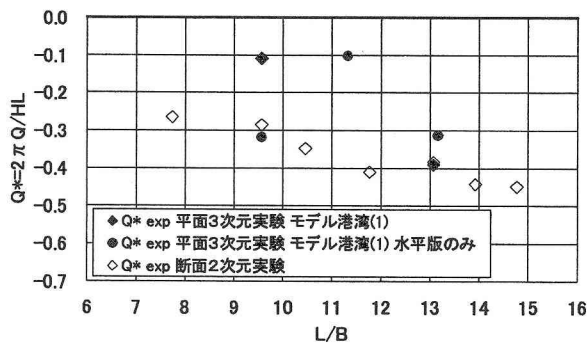


図-6 海水交換促進型防波堤よりの輸送流量 ($H_{in} \approx 10\text{cm}$)

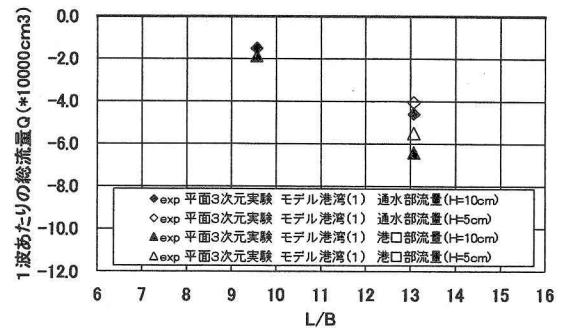
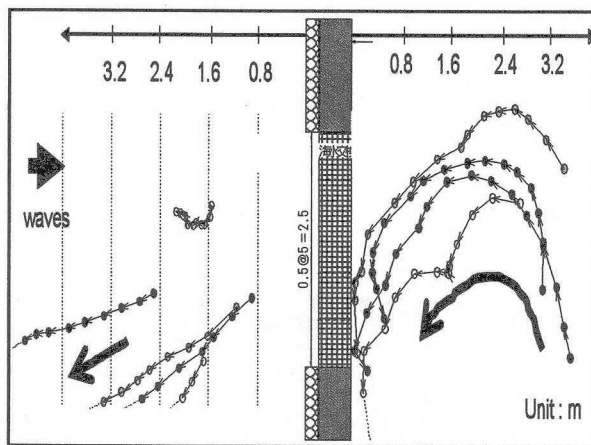
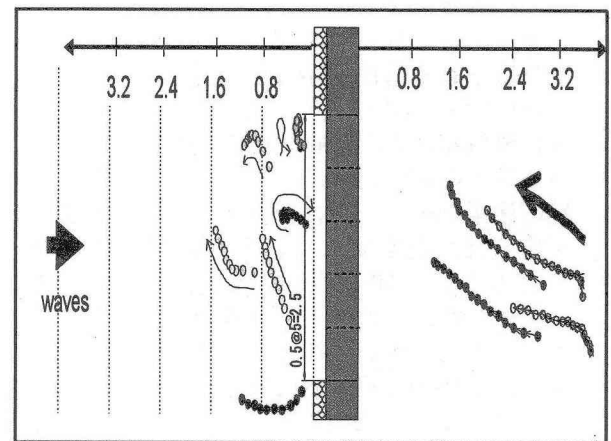


図-7 各通水部よりの総流量の比較



(a) 海水交換促進型防波堤
(1周期毎プロット, 10周期相当分)



(b) 直立不透過堤
(2周期毎プロット, 18周期相当分)

図-8 トレーサー追跡実験結果による港湾域の流況; モデル港湾 (1) $T_{in}=1.8\text{s}$ $H_{in} \approx 10\text{cm}$

の線形和を求めることで、最終的な平均流場の算定結果とした。厳密には、海水交換防波堤よりの冲向き流れと波浪場の干渉を考慮する必要があるが、ここでは簡略的な結果を得るため、そのような干渉は無視した。なお、算定に必要な海水交換防波堤の透過・反射率や輸送流量などは以前の断面2次元実験による結果¹⁾を参照して与えた。

4. 結果および考察

(1) 港内の静穏化効果について

実験では、最初にモデル港湾 (1) の海水交換促進型防波堤 (5ユニットで構成) の中央堤体を対象にして、反射率 C_r と透過率 C_t を測定した。このとき、厳密には平面的な波変形となるが、近似的に断面2次元的な波変形が再現されるものと仮定して C_r 、 C_t を推定した。この結果を示すのが図-4であり、周期に関する無次元量 L/B による変化で示してある。図中には、以前の断面2次元実験による結果¹⁾および同様に断面2次元を想定した減衰波理論による算定結果も併せ示す。平面実験による擬似2次元的な結果は、透過率 C_t で0.2以下、反射率 C_r で0.3以下と十分な制御効果が認め

られる。そして、以前の断面2次元実験による結果と比較すると、透過率が多少高くなる傾向にあるが、ほぼ対応した結果であることが分かる。透過率が多少ながら高くなる理由としては、港口部よりの回折波などの平面的な波変形の影響や陸域境界からの反射の影響によると考えられる。

図-5 (a), (b) は、非定常緩勾配方程式による港湾域の平面波高分布の算定結果の代表例を示す。各図は、それぞれ海水交換型防波堤を設けた場合と不透過直立堤とした場合の結果に相当する。図中で波高は入射波高で除した波高比で示す。

これらの図の比較から、外郭防波堤の一部を透過性の海水交換型防波堤としても、港内側の静穏度は不透過直立堤の場合とほぼ同程度に保たれていることや沖側海域において波高比は全体的に低下するなど反射波の低減効果も認められる。このように、本研究で提案した海水交換促進型防波堤は、平面波浪場においても十分な波浪制御効果が期待できることが分かる。

(2) 海水交換機能

図-6は港湾モデル (1) の海水交換促進型防波堤通水部において計測した流速時系列に基づき

求められる平均輸送流量を示す。輸送流量は、一波当りの流量 Q に換算して、進行波による半周期間の移動水塊量($HL/2\pi$)で除した無次元輸送流量 Q^* で表示してある。このとき輸送流量は港外に流出するものを負と定義した。図中には、波浪制御効果の検討のときと同様に断面2次元実験による結果についても併せ示す。なお、堤体後面に重量物を持たない堤体の輸送流量を「水平版のみ」として図中に併せ示す。

図中に示す平面実験結果では、波周期による平均輸送流量のばらつきが見られるが、比較的長周期の $L/B=13$ の条件では断面2次元による結果に近い。短周期側でのばらつきは、防波堤沖側での平面的な部分重複波の形成が顕著になることの影響などによると推定される。

図-7は、海水交換促進型防波堤列を通して港内より港外に排水される総流量と港口部より港外から港内に導入される総流量を1波当りに換算して示す。両総流量は、流速測点数が十分でないため、多少の相違が見られるが、ほぼ流量の保存が成立していることが認められる。このように港内水の循環は、ほぼ海水交換促進型防波堤よりの輸

送流量に着目することで評価できると考えられる。このとき、港口部よりの導入水がどこから供給されるかが重要になるが、これについては次に述べる。

(3) 港湾域の流れ

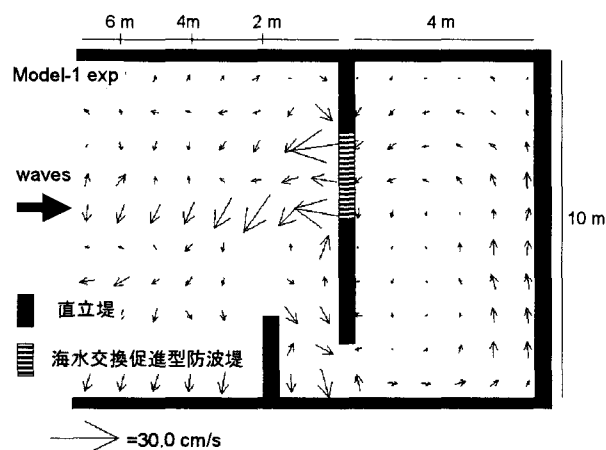
(a) 港湾域の循環特性(モデル港湾(1))

図-8(a),(b)は、トレーサーを用いた港湾域の流況観測の結果を示すもので、それぞれ海水交換促進型防波堤を設置した場合と直立不透過堤とした場合の結果に相当する。各トレーサーは堤体構造に応じて1周期あるいは2周期毎に図中にプロットされている。直立不透過堤の場合、トレーサーの動きが鈍いことから2周期毎のプロットとしてある。

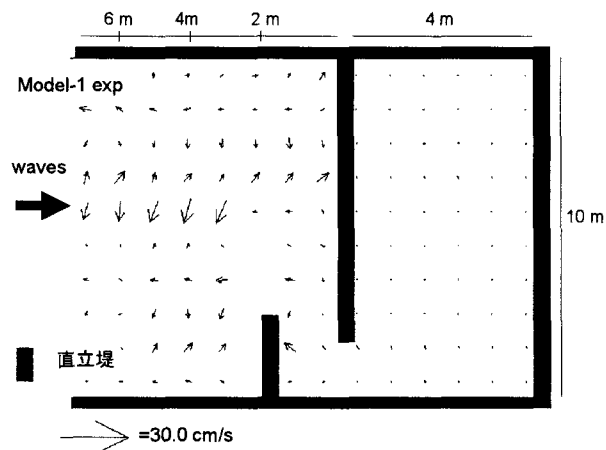
図-8(a),(b)の比較から分かるように、全て直立不透過堤とすると、防波堤港外側のトレーサーはほとんど停滞しているのに対し、一部を海水交換促進型防波堤に変更すると有意な速度で沖側に流出するようになることが認められる。また、港内においても、海水交換促進型防波堤に変更することでトレーサーは湾奥より円を描きながら海水交換促進型防波堤に向うようになり、港内水の交換に有効な流れが発生するようになることが分かる。

図-9(a),(b)は、港湾域内外に設けた格子点上で測定した流速時系列から求めた平均流速の分布を示す。(a),(b)図は、やはり海水交換防波堤を設けた場合と直立不透過堤とした場合の結果に相当する。このとき流速の水深方向における測定位置は、水面下20cmの水深中央部であり、前出の水表面の流況の結果と併せて水深全体にわたる流動特性をある程度判定できると考えられる。

図-9(a)より、海水交換型防波堤の沖側近傍では、強い平均流が見られるが、これは防波堤よりの渦流れの影響を局所的に強く受けていることによる。そして、中層付近の流動結果においても、海水交換型防波堤を設けると防波堤よりの沖向き



(a) 一部が海水交換型防波堤 $T=1.8s$, $H_{in} \approx 10cm$



(b) 全て不透過堤(直立堤) $T=1.8s$, $H_{in} \approx 10cm$

図-9 港湾域の時間平均流速 [モデル港湾(1)]
計測位置 水深中央部で水面下20cm]

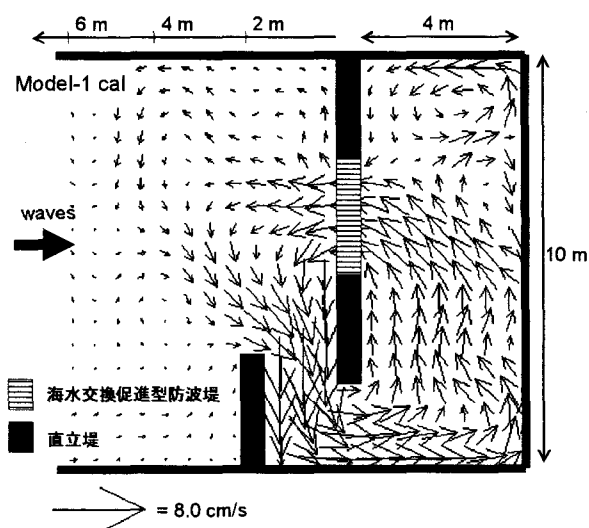
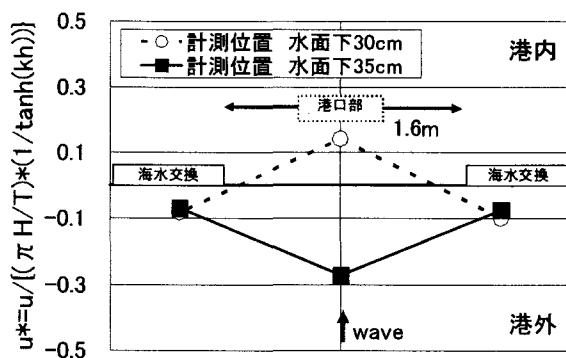
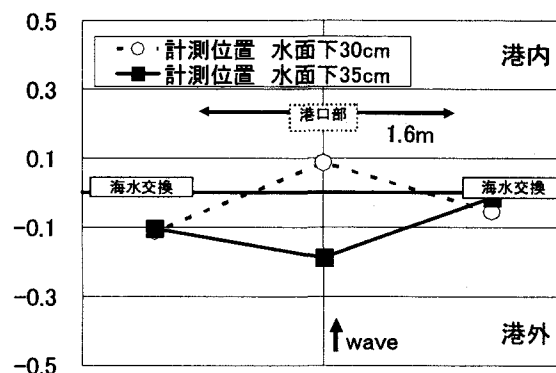


図-10 非常緩勾配方程式による平均流の算定結果
(海水交換促進型防波堤あり, $T=1.8s$ $H_{in} \approx 10cm$)



(a) $T=1.9s$ $H_{in} \approx 10cm$



(b) $T=1.8s$ $H_{in} \approx 12cm$

図-1.1 港口部および海水交換促進型防波堤における時間平均流速

の流れが卓越することや、港内においても前述した表面流況にほぼ対応して有意な平均流が発生していることが分かる。そして、海水交換防波堤より沖側に排水された水塊は、一部は港口部より再度港内に流れ込むが、大半のものが沖合に流出する傾向にあり、港内水が効果的に港外水と交換されるといえる。

一方、直立不透堤の場合、港内の平均流はかなり小さく、停滞性の強い水域になりやすいことが分かる。

図-1.0は、非定常緩勾配方程式による平均流の算定結果の一例を示す。これは、海水交換型防波堤を設けた場合の結果に相当するが、海水交換型防波堤をポンプとするような一方向循環流が予測され、実験結果の傾向とは定性的にも異なる。これは、算定モデルにおいて、海水交換防波堤による平均流と波との相互干渉効果を見逃していることや海水交換防波堤の沖側近傍での局所的に強い渦流の影響などが十分にモデル化できていないことなどによると考えられる。このような算定モデルの改良については、今後続く検討課題としたい。

(4) モデル港湾(2)での平均流

図-1.1は、モデル港湾(2)における港口部近傍の平均流速を示す。港口部・海水交換促進型防波堤のいずれも水面下30cm、35cmの2点において計測を行っている。海水交換促進型防波堤によって、沖向きの平均流が生じ、港口部においても港口部底部(水面下35cm)で沖向きの流れが存在する。しかし、港口部上部(水面下30cm)では、岸向きの流れとなるなど、港口部全体として流れがどちらに卓越するかは現時点では不明である。今後はさらに詳細な測定を行うと共に開口部の長さの影響などについても検討していきたい。

一応、現時点では、港口部に砂が堆積しないような平均流を生成するという目標に対しては、水底付近で沖向きへの平均流が発生していることから、有望な埋没対策法となり得ると考えられるが、漂砂の挙動についても考慮する必要がある。今後

の検討課題としたい。

4. 結語

- (1) 波による渦流を利用する海水交換促進型防波堤は、平面波浪場である港湾域においても十分な波の遮蔽効果や反射波低減効果を期待できる。
- (2) 閉鎖性の強い港湾の外郭防波堤の一部に渦流制御式海水交換促進型防波堤を設けると、港内水が防波堤通水部を介して効果的に排水でき、港内の海水交換を有効に促進できる。このとき、港外側においても有意な沖向きの平均流が生成されるなど港湾域周辺の流れ場を活性化できる。
- (3) 渦流制御式海水交換促進型防波堤による港湾域での海水交換量は、概略的に防波堤一基当りの通水量を基準にして推定できる。このとき、防波堤により排水された水塊が港内に再供給される場合もあるが、その割合は比較的小さい。
- (4) 港口部の両側に渦流制御式海水交換促進型防波堤を設置することで、港口部水底付近に沖向きの平均流を発生させることが可能であり、港内埋没防止等に寄与する可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 大村智宏, 中村孝幸, 大井邦昭, 中山哲蔵: 下部通水式海水交換型防波堤の波浪制御効果に及ぼす通水路の影響について, 海洋開発論文集, Vol. 20, pp. 547-552, 2003.
- 2) 中村孝幸, 大村智宏, 大井邦昭: 渦流制御を利用する海水交換促進型防波堤の効果について, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 806-810, 2003.
- 3) 中村孝幸, 井手善彦: 波の逸散現象を考慮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, Vol. 13, pp. 177-182, 1997.
- 4) 土木学会, 海岸工学委員会, 研究現況レビュー小委員会: 海岸波動, 1994.