

港湾における遊水室型海水交換防波堤の 効果について

PERFORMANCE OF A WATER EXCHANGE BREAKWATER OF WATER CHAMBER TYPE IN A HARBOR

中村孝幸¹・大村智宏²・兼貞透³

Takayuki NAKAMURA, Tomohiro OHMURA and Toru KANESADA

¹正会員 工博 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)

²正会員 工修 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所(〒314-0408 茨城県神栖市波崎7620-7)

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)

In the previous study, we have proposed a water chamber type water exchange breakwater, in which the unidirectional current is excited by the vortex flows driven by wave motions in the water chamber. This breakwater has another great advantage, i.e., low wave reflections and transmissions. It has a great deal of wave energy dissipation function. In this study, we have examined effectiveness of the new water-exchange breakwater in the three wave fields, typically in a harbor. The harbor tranquility obtained by the new breakwater was examined as compared to the conventional vertical breakwater case. The numerical analysis based on the vertical line source Green's function method was used to predict the calmness in a harbor partly surrounded by the water exchange breakwater. The mean current feature and its effect in a harbor induced by wave actions about the water exchange breakwater were also examined experimentally to improve the water pollution problem in a harbor.

Key Words : Water exchange, harbor tranquility, water chamber type breakwater, effectiveness

1. はじめに

港湾では、主に港内の静穏度に着目して防波堤などの外郭施設が建設されてきた。しかし、静穏度を求めるあまりに港内外の海水交換が抑止され、港内の水質悪化が問題視されるようになってきた。このため、その対策方法の一つとして透過性防波堤や海水交換型防波堤が利用されるようになってきている。

既に著者ら¹⁾は、本来の防波機能を維持しつつ、渦流れを利用して海水交換が促進できる海水交換促進型防波堤として、垂下版と没水平版で構成される遊水室型海水交換防波堤を提案し、これまでに、波浪制御効果や海水交換機能に及ぼす断面諸元の影響について検討してきた。この研究では、遊水室型海水交換防波堤として、実際場を想定して、防波堤底面の通水部高さが低く、前面から見た通水部開口率が6割程度とボックスカルバート構造とした模型を用いて、模擬港湾における海水交換や港内静穏化効果などを明らかにする。この際、従来の断面2次元実験による海水交換量との比較検討も行ない、海水交換機能に及ぼす周辺境界の影響などについて考察する。

2. 実験装置および実験方法

(1) 模型堤体

実験に用いた遊水室型海水交換防波堤は、図-1に示す防波堤底面の通水部高さが9 cm、前面から見た通水部開口率が6割程度とボックスカルバート構造とした模型を採用した。この堤体では、遊水室背後に耐波安定性を増すため、遊水室とほぼ同程度の重量部が設けてある。この堤体断面は、以前の断面2次元的研究¹⁾において、現地に即した構造で最も効果的であることが判明している。

また、模型堤体としては、比較のため、不透過直立堤と下部通水型矩形堤を用いたが、これは上記の堤体の前面に鉛直版を通水部、もしくは、没水平版まで取り付けることで実現した。

(2) 模型港湾

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平面水槽(長さ 26.3m×幅 10.0m×高さ 1.0m)を用いた。

モデル港湾は、図-2に示す不透過直立堤に囲まれた港湾を想定し、湾奥部に前述した各形式の模型

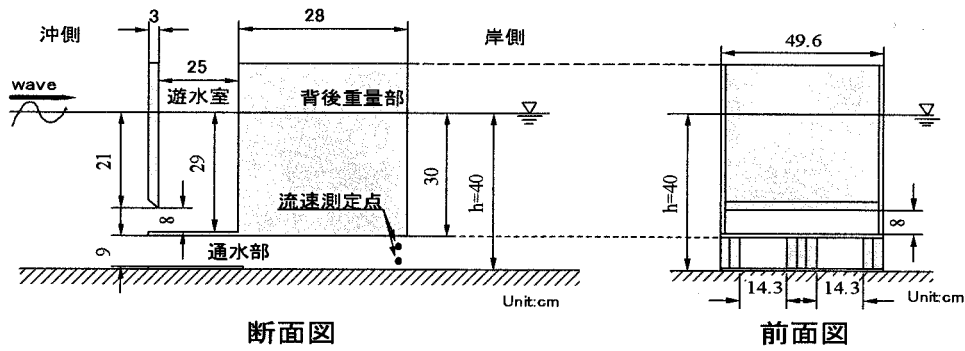


図-1 遊水室型海水交換防波堤の模型
(縮尺 1/20, 通水部開口率 57%)

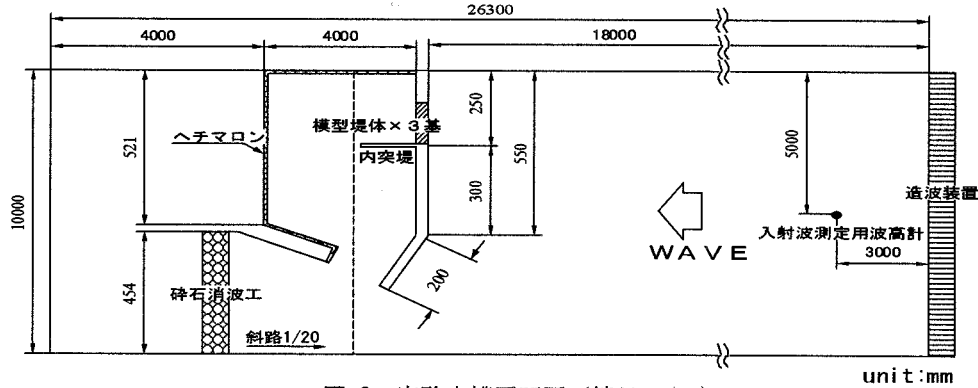


図-2 実験水槽平面図 (縮尺 1/25)

堤体をそれぞれ3基（一基当たりのユニット長0.5m）設置した。また、港湾内には、平均流の湾奥への循環をよくするため、内突堤（長さ1m）を設置した。なお、ここで想定した模型の縮尺は 1/25 程度である。

(3) 実験方法

a) 波高分布

港内外の波高分布を測定するため、図-3 に示すように外郭防波堤の堤体列に対し平行に7台の波高計を 80cm の間隔で観測台車に配置し、この観測台車を波向き方向に移動して、港内5測線、港外3測線において波高を測定した。波高の測定位置は図-3 に示すように計56点である。

b) 濁度希釈実験

この実験は、遊水室型海水交換防波堤による港内水と港外水の交換能力を定量的に把握するために実施した。具体的には、最初に港内を懸濁水で充たしておき、波の作用に伴う港内濁度の希釈度合いの変化を経時的に測定することで行った。

希釈度合いの変化は、光学式濁度計を5台用いて観測した。これらは、図-4 に示すように港内全域を網羅するように配置した。

また、港口部には、電磁流速計を2台、模型堤体の通水部には、ドップラー流速計を2台設置して、流速時間波形や平均流速を観測できるようにした。

濁度計の設置位置は、水底より鉛直上方に 20cm とほぼ水深を等分する位置とした。濁度変化の測定時間は造波開始から 60 分間とした。このとき、

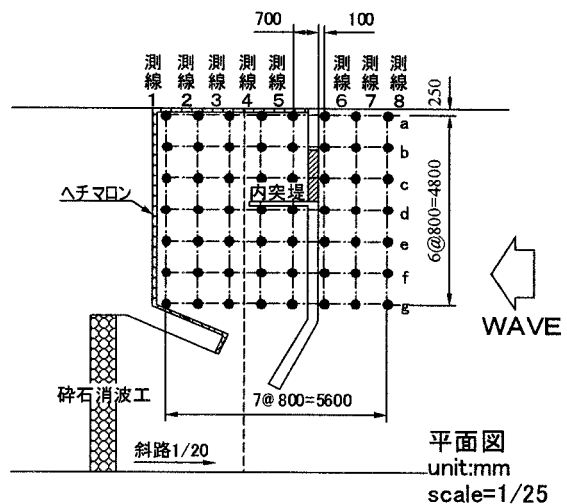


図-3 波高計設置位置

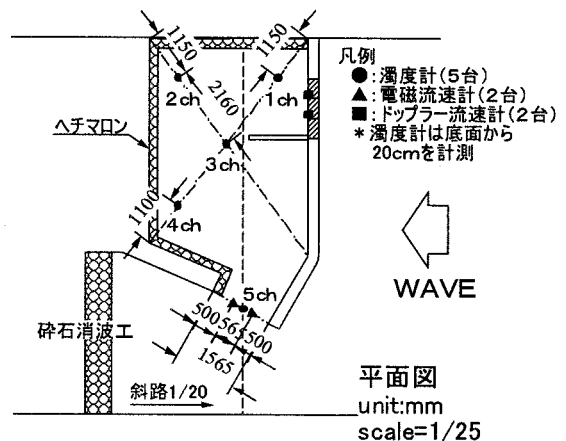


図-4 濁度計・流速計設置位置

懸濁物質にはカオリンナイトを用い、あらかじめ港口部および海水交換防波堤の通水部を閉じた状態で港内に懸濁物質を投入して港内の濃度を一様にして、造波開始1分間の平均からの濃度の変動を測定した。

(4) 実験条件

実験に用いた入射波の条件は、比較が容易となるように、以前の断面2次元実験¹⁾で用いたものと同条件とし、設置水深 h も同様に40cmに固定した。用いた波条件を各実験項目別に表-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波長と遊水室幅の比 L/Bw の値も付記してある。なお、各実験項目について共通して使用した波条件である、 $T=1.4s$ 、 $H=5cm$ の条件は、以前の断面2次元実験の検討結果¹⁾において、反射・透過率の両者が0.2程度以下と消波効果に優れ、しかも十分な海水交換能力が確認されていることより採用した。図-5は、この検証結果を示すもので、本実験と同様に前面から見たときの通水部の開口率が57%であるなどほぼ同一条件での断面2次元実験による反射・透過率の結果を示す。

表-1 波条件

周期 $T(s)$	目標波高 $H(cm)$	波長 $L(cm)$	L/Bw
濁度希釈実験			
1.4	5	239.1	9.6
流速測定			
1.3	5	216.5	8.7
1.4	5	239.1	9.6
1.5	5	261.4	10.5
1.6	5	283.4	11.3
1.8	5	326.7	13.1
2.0	5	369.3	14.8
2.2	5	411.3	16.5
波高分布			
1.2	5	193.5	7.7
1.4	5	239.1	9.6
1.8	8	326.7	13.1

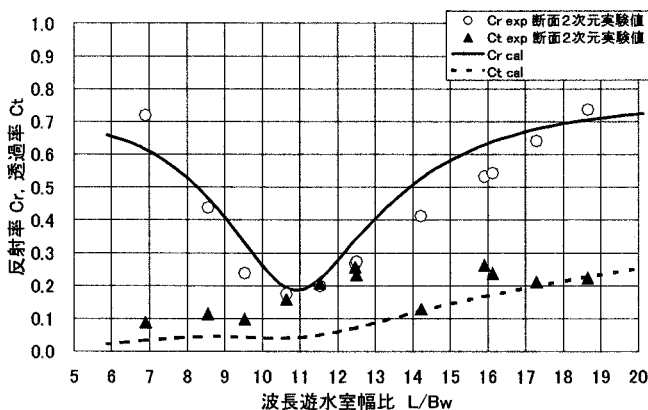


図-5 遊水室型海水交換防波堤の断面2次元実験における反射率および透過率
(通水部開口率57%, $H=5cm$, $h=42cm$, $Bw=25cm$, $f_c=0.20$)

3. 結果および考察

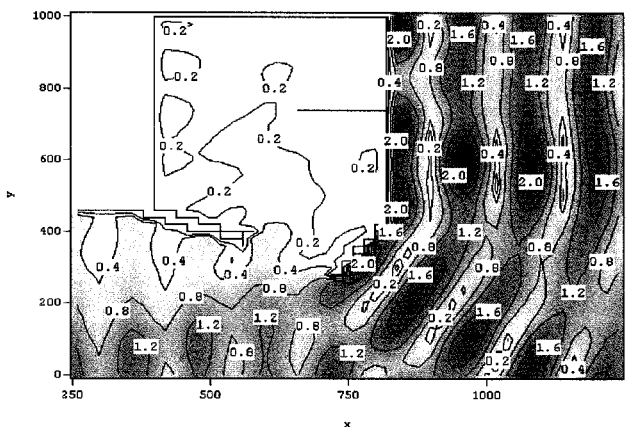
(1) 港内静穏化効果について

図-6(a), (b)は、港内静穏度の理論的な予測を目的として、中村ら²⁾による鉛直線グリーン関数法による平面波浪の算定結果の代表例を示す。この理論解析では、港湾境界での反射率と透過率が必要とされ、ここでは図-5に示す断面2次元的な検討結果による反射・透過率の結果を用いた。例えば、海水交換防波堤の場合、 $T=1.4s$ では反射率 $Cr=0.24$ 、透過率 $Ct=0.05$ とした。

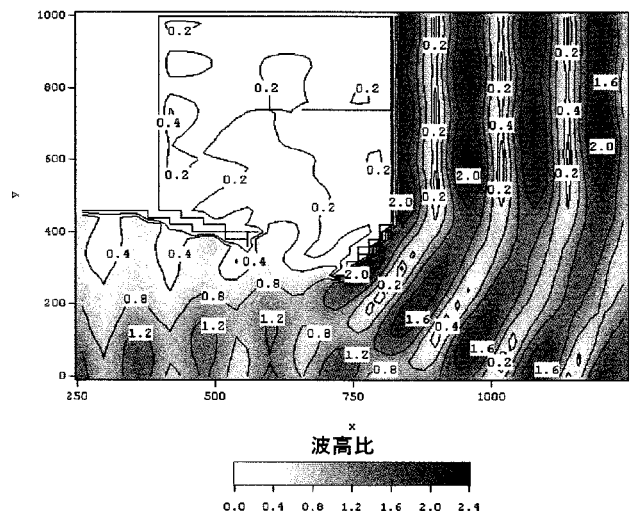
各図は、それぞれ遊水室型海水交換防波堤を設置した場合と不透過直立堤を設置した場合の算定結果に対応する。図中では、波高を入射波高で除した波高比で示す。

また、図-7(a), (b)は、代表例として図-3の波高計設置位置の中で、測線c上での波高比の理論算定結果と実験結果の比較を示す。

これらの図より、外郭防波堤の一部に透過性防波堤である遊水室型海水交換防波堤を設置しても、港内の静穏度は、不透過直立堤のみで構成された場合と比較して、同程度に保たれることが認められ、十分な静穏化効果が期待できることがわかる。

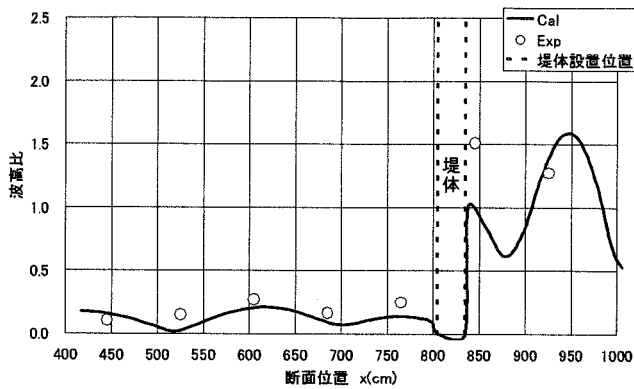


(a) 遊水室型海水交換防波堤を設置した場合

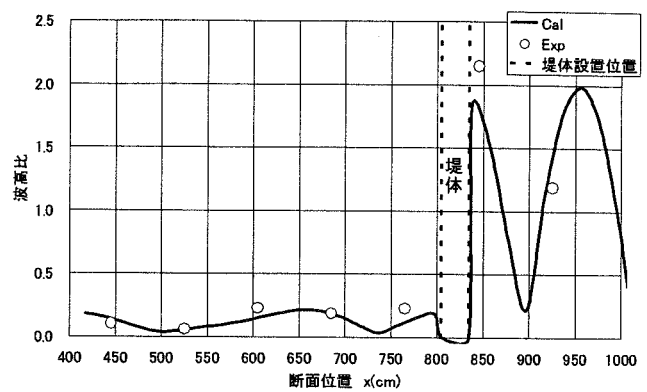


(b) 全て不透過直立堤とした場合

図-6 鉛直グリーン関数法による港湾域の波高分布
(入射波高で除した波高比, $T=1.4s$)



(a) 遊水室型海水交換防波堤



(b) 不透過直立堤

図-7 測線cにおける波高分布 (T=1.4s)

また、沖側海域においては、海水交換防波堤の設置位置付近において波高比が低くなっており、その反射波低減効果が確認できる。ただし、海水交換防波堤の隣周辺では不透過直立堤構造であるため、図-7(a)に見られるように、断面2次元的な結果（図-5）から推定されるような低波高比（1.2程度）は実現できないようである。

(2) 模擬港湾実験における海水交換機能

図-8, 9 は、模擬港湾で設置した3基の海水交換防波堤の中でその中央部に位置する堤体を対象にして測定した平均輸送流速および平均輸送流量の結果を示す。これらの図中には、ほぼ同構造の堤体を用いて、しかも同一の波条件下における断面2次元実験による結果を比較のため併せ示す。図中では、周期を表すパラメータとして L/Bw （波長遊水室幅比）による変化で示す。

無次元の断面平均輸送流速 U_a^* は、まず通水部で求めた時間平均流速 U に通水部開口率を乗じて、断面平均値 U_a に換算し、これを進行波の静水面位置での水平流速振幅に比例する量 ($\pi H/T$) で除して無次元化したものである。その定義は、次式による。

$$U_a^* = U_a / (\pi H / T) \quad (1)$$

一方、無次元断面平均輸送流量 Q_a^* は、前出の U_a に通水部断面積と波周期を乗じて一波あたりの断面平均輸送流量 Q_a に換算し、これを進行波による半周期間の移動水塊量 ($HL/2\pi$) で除して無次元化したものである。その定義は、次式による。

$$Q_a^* = Q_a / (HL/2\pi) \quad (2)$$

この際、沖向きへの輸送流量を負と定義している。

これらの図より、模擬港湾の外郭防波堤の一部に設置した海水交換防波堤においても、断面2次元的な検討結果と同様に、港内から港外側へ向か

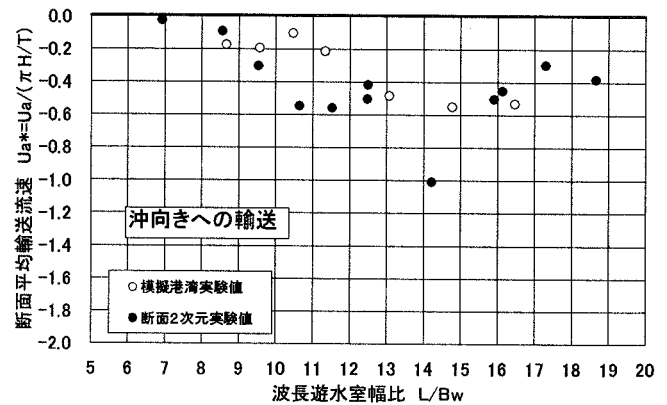


図-8 平面水槽実験と断面2次元実験における断面平均輸送流速

(通水部開口率57%, H=5cm, h=40cm, Bw=25cm)

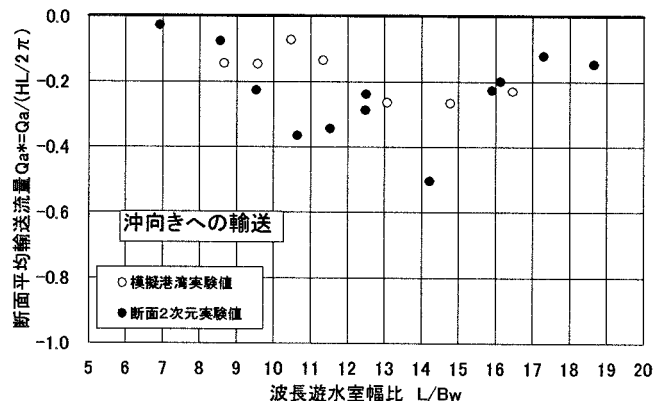


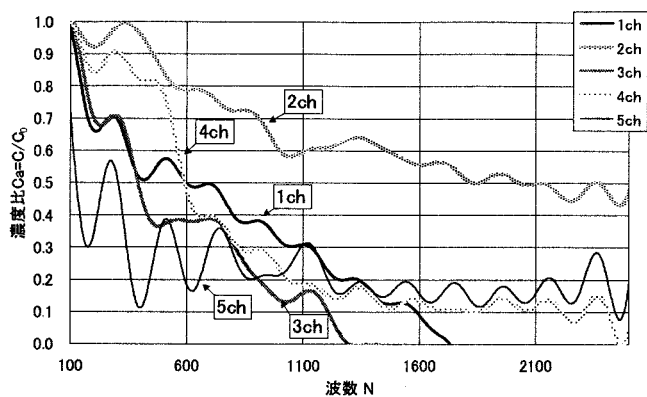
図-9 平面水槽実験と断面2次元実験における断面平均輸送流量

(通水部開口率57%, H=5cm, h=40cm, Bw=25cm)

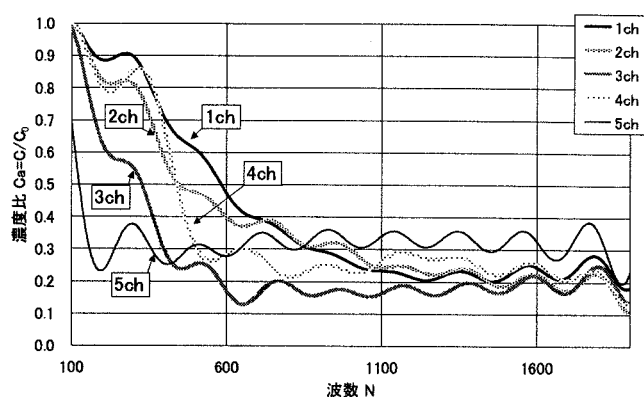
う平均輸送流速および流量が現れることが確認できる。それらの絶対値は、断面2次元実験による値と比較すると、多少低くなるものの、無次元平均輸送流量で-0.2前後と比較的大きな海水交換量が期待できることが分かる。また、港湾のような平面波浪場における海水交換量は、断面2次元実験に基づいて推定しても良いといえる。

(3) 港内濁度の希釈効果について

図-10(a), (b)は、遊水室型海水交換防波堤を設



(a) $T=1.4s, H=5cm$



(b) $T=1.8s, H=5cm$

図-10 遊水室型海水交換防波堤を設置したときの港内濁度変化

置したときの各濁度測定点の濃度変化を異なる二つの波条件について示す。図中では、造波開始後1分間の濃度の平均値を初期濃度 C_0 とし、各時点での濃度 C をこれで除したものを無次元濃度 Ca として示す。図中では、波の作用時間を波周期で除した作用波数 N で表す。各濁度計の位置を示す1ch～5chは、図-4に示すとおりである。

これらの図より、濁度測点が港口部に近い5chにおいて最も濃度低下が素早く現れ、あとは港口部から海水交換防波堤に到る経路上にある順番に従って濁度低下が順次に見られる傾向にある。これは、やはり海水交換防波堤より港内水が港外へ流出し、これに伴い港口部から港外水が流入することによる影響と考えられる。また、内突堤は港口部より流入する港外水の流れを、その周囲を回り込むように流向変化させる役割を果たしており、湾奥の海水交換に役立つものと考えられる。

また、周期 $T=1.4s$ の波条件では、港奥部における濃度希釈は、緩やかで、最終的に濃度比は0.5程度であったのに対して、周期 $T=1.8s$ では、急激に低くなっており、0.2程度まで低下することが認められる。このことより、長周期の波条件になると、海水交換量が増大し、港内の海水交換が短時間の間に行われることが分かる。これは、通水部での平均輸送流量を示す、図-9からも容易に推測されるが、内突堤の存在も重要と言える。すなわち、内突堤を設けることで、港口部よりの港外水が港奥部まで回流するようになったものと推定され、港内の海水交換には、平均流量のみならず、その流向も重要になると考えられる。

図-11は、各構造の堤体の海水交換機能に関する比較を行うため、それぞれの堤体を設置したときの港内濃度の空間平均値の経時変化を示す。やはり、経時変化は作用波数による変化として示す。

この図より、遊水室型海水交換防波堤を設置した場合、港内濁度の希釈度合いは、他の2形式である不透過直立堤と下部通水型矩形堤の場合に比較して、早く進むことが分かる。そして、ケーソン堤の下部に通水部を設けるなどの海水交換工法は、不透過直立堤と比較してそれほど濁度の希釈度合いに差異がなく、有効な方法とは言い難い面

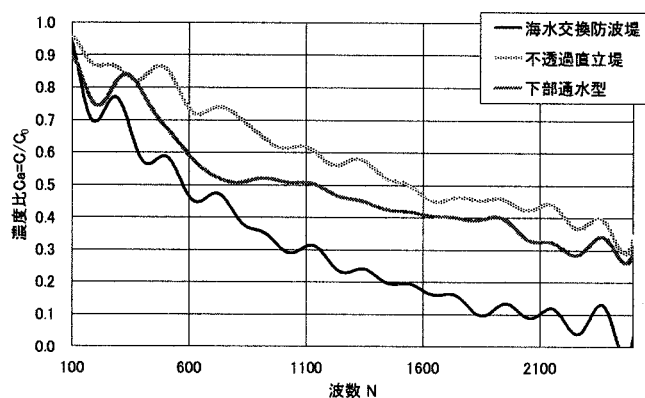


図-11 各模型堤体における港湾全体の濃度平均
($T=1.4s, H=5cm$)

がある。

4. 結語

本研究より得られた成果は以下のとおりである。

遊水室型海水交換防波堤を外郭防波堤の一部に設けても、港内の静穏化効果は、不透過直立堤のみで構成される港湾と同程度であることが理論算定結果や実験結果により確認され、十分な静穏化効果が期待できる。また、海水交換防波堤の港外側において、重複波の波高値は低く、その反射波低減効果が確認された。

模擬港湾実験における遊水室型防波堤の海水交換量は、過去に実施した同一断面での断面2次元実験によるそれと比較すると、多少低くなるものの、それほど有意な差異は見られず、断面2次元実験に基づいて海水交換機能の検討を行ってもよいと判断される。

模擬港湾の外郭防波堤の一部に海水交換防波堤を設置すると、港内濁度は、波の作用時間に伴い急激に低下する傾向が見られ、海水交換が効果的に行なわれることが確認された。また、比較実験として実施した、下部通水型の矩形防波堤や不透過直立堤では、このような濁度の急速な希釈は観測されず、港内水が滞留しやすいことも確認できた。

湾奥部などで港内の流れが滞留しやすいときには、流向制御を兼ねた内突堤などを設置すると、滞留部を含めて、効果的に港内の海水交換が可能となる。

謝辞

本研究は、(財)災害科学研究所に設けた沿岸新技術研究会と(独法)水産総合研究センター水産工学研究所との共同研究による成果の一部であり、実験等にご協力いただいた関係各位に深甚の謝意

を表する。

参考文献

- 1) 中村孝幸, 中山哲蔵, 大村智宏, 榎本一徳, 兼貞透 : 遊水室型海水交換防波堤の効果に及ぼす通水部構造と基礎マウンドの影響について, 土木学会海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 736-740, 2006.
- 2) 中村孝幸, 佐伯信哉 : 透過堤を含む港湾域の波高分布の算定法に関する研究, 土木学会海洋開発論文集, 第 15 巻, pp. 339-344, 1999.