

港内水理環境から見た外郭施設の 適切配置に関する研究

STUDY OF THE BREAKWATER LAYOUT TO MAINTAIN TRANQUILITY AND EXCHANGE WATER IN SMALL HARBOR

森田修二¹・尹 晟鎮²・出口一郎³

Shuji MORITA, Seongjin YOON and Ichirou DEGUCHI

¹正会員 工博 (株)奥村組 技術本部土木部 (〒108-8381 東京都港区芝5-6-1)

²正会員 工博 財団法人災害科学研究所 (〒530-0003 大阪市北区堂島2-2-2)

³正会員 工博 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

In the design of breakwater layout of the harbor, the first priority must be given to maintain tranquility. At the same time, we have to pay attention to keep the water quality in the harbor. We have investigated the functions of breakwaters with channel to exchange water in harbors.

In this study, we examined the performance of the breakwater layout and the breakwater with channel in small harbor to maintain tranquility and exchange water in the obliquely incident wave and tidal current. In a three-dimensional wave basin we examined the several cases of the breakwater layout in the model harbor, that is, the width, shape of the entrance, water area in harbor, and so on. We also examined the possibility for predicting waves in harbors of various shape numerically by using experimental results.

Key Words : Exchange of water, tranquility of the harbor, breakwater with channel, tidal range

1. まえがき

マリーナなど港湾の水域施設の設計に際しては、波浪に対する静穏性、係留船舶の安全性や快適性、水質環境、長周期対策などを検討する必要がある。一方、現状では従来の港湾を参考にした設計や波浪に対する解析的な検討を踏まえて設計されることが多い。これらの環境は港口や防波堤（海水交換型防波堤など）、スロープなどの外郭施設の形状・配置によって大きく影響を受ける。

本研究では外郭形状を一定フレキシブルに変更できる港湾模型を用いて、各環境項目に対して適切な形状・配置を実験的に検討することを目的としている。防波堤については海水交換型防波堤¹⁾²⁾の効果も検討した。また、数値解析手法を用いて解析的な検証も行う。

2. 港内静穏度の実験

(1) 実験の概要

本研究では外郭形状を一定フレキシブルに変更できる

港湾模型を用いて、港内静穏度に対する適性を実験的に検討した。図-1には平面水槽内（10m×13m）に港湾模型（3m×1.5m）を配置した状況を示している。実験には大阪大学の3次元造波水槽を用いた。

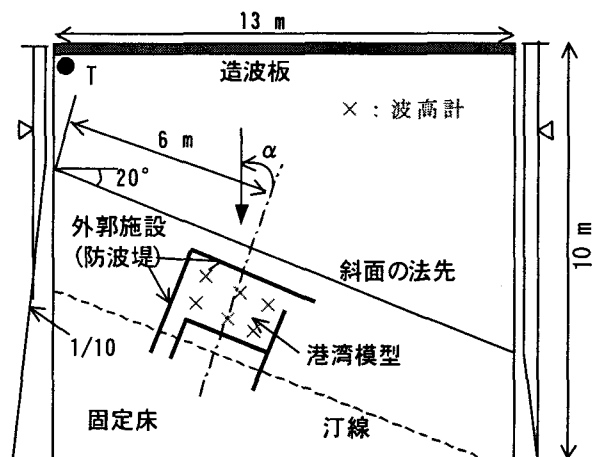


図-1 実験に用いた水槽の概要

図-2には港湾模型の主なタイプを示した。Type1をプロトタイプ(現地の1/50程度)として幅が3m, 奥行1.5mの矩形形で港口幅が0.5m, 突堤長が1.0m, スロープは汀線側の左端に位置している。Type2は左隅角部を処理, Type3は左隅角部と右隅角部を処理した形状, Type4は港口部が鉤型形状の模型を示している。港湾模型は長さ0.5mと1.0mのブロック(幅0.1m)で製作しており, 一定フレキシブルに形状を変更することができる。将来的には現地の港湾形状を想定した模型の製作を考えているが, 今回の実験ではType1のような単純な形状をプロトタイプと設定し, 港内の静穏度や流れに影響すると考えられる港口部やコーナー部の形状, スロープの配置などについて検討した。実験に用いた波の条件を表-1に示した。

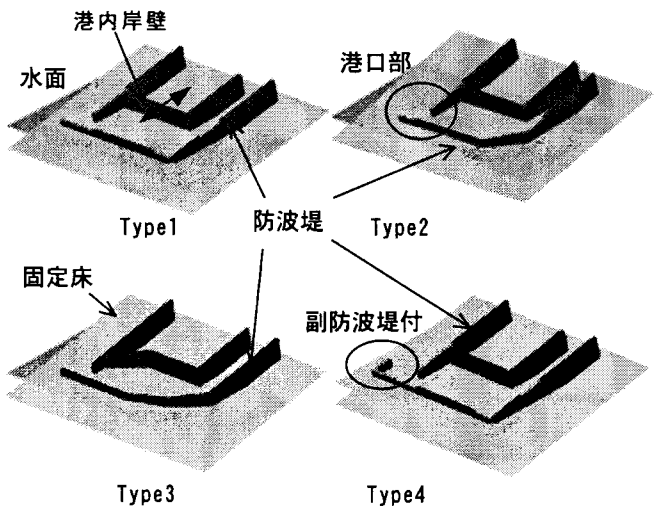


図-2 主な港湾模型の形状

これらの模型を用いて以下の項目について実験を行った。模型の防波堤をユニット毎に自由に移動させて表-2に示す実験を実施した。ここで, L は周期1秒における沖側波長, $A(=9m^2)$ はType1の外周防波堤で区切られた水域面積である。太字は各検討項目の中でプロトタイプとしたType1に該当する実験条件を示している。港湾模型の代表長さ($W=3m$)の沖波波長比は $W/L_0=2\sim4$ である。

表-1 波の条件

	周期(秒)	波高(cm)	水深(cm)
規則波	0.7, 0.8, 0.9, 1.0	3~5	沖側 35
不規則波 (Bretschneider -Mistuyasu)	1.0(平均)	3~8(平均)	港内 30~15

表-2の①~③は港内への波の伝播効果を検討したもので, ④~⑥は港内における波の反射・減衰効果を検討したものである。測定には容量式波高計と電磁流速計を用い, 波高計を沖側に2本, 港内に6本, 流速計を港口に2本配置した。流速は中央水深で測定した。

表-2 港湾模型の実験条件 (縮尺: 1/50)

検討項目	内容
① 港口幅D(m), (D=D/L)	0.3(0.21), 0.5(0.35) , 1.0(0.7)
② 波の入射角 α (deg)	0, 20 , 40
③ 港口突堤形状	副防波堤なし 副防波堤あり (Type4)
④ スロープ位置	左端 , 中央, 右端
⑤ 隅角部の形状	全角直角 左角鈍角 (Type2) 全角鈍角 (Type3)
⑥ 港内面積 A_w (m ²) ($A_w=A_w/A$)	2.9(0.32), 4.5(0.5) , 6.0(0.67)

(2) 港口幅の影響

図-3には港口幅の影響についてプロトタイプとするType1の模型形状について港口幅の3種類について実験を行った結果を示した。また, 港口形状を波が入射しにくい副防波堤付(港口幅0.5m)としたType4の結果も合わせて示した。横軸には波数 $k(=2\pi/L_0)$ と水深 h (沖側の一定水深35cm)の積, L_0 は波の波長(沖側の一定水深における波長), 縦軸は無次元波高(沖側の入射波高 H_0 に対する波高比)である。波高は港内の波高計(6点)の2乗平均和を用いた。実験結果では, 港口幅が大きいほど波高比は大きく波数が小さいほど波高比が大きくなっている。港口幅が大きいほど外部から波が伝播しやすくなるので妥当な結果と考えられる。また, 港口形状は副防波堤付が最も波高が小さく, 港口幅を変えるよりも波の伝播を抑制するには効果的であることがわかる。

一方, 白抜きの印で不規則波による結果を有義波高について整理した結果を示したが, 規則波と大きな差異は見られない。したがって, 不規則波についても有義波を用いれば, 規則波と同様の考察ができると考えられる。

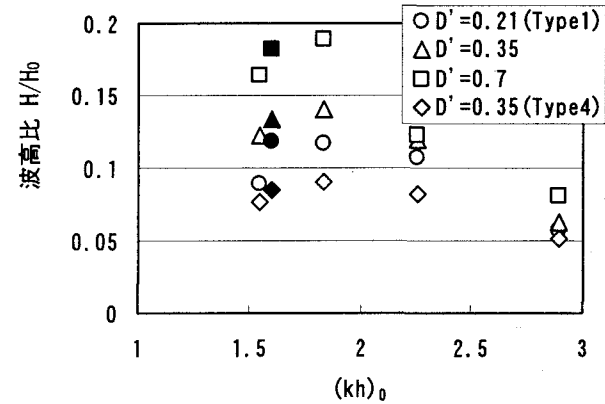


図-3 港口幅による波高の変化

(3) 入射角の影響

図-4には波入射角による影響を検討した結果を示した。Type1の模型全体を回転させることで波の入射角を変化

させた。図-1の入射角 α が0度、20度、40度とした場合の結果を示した。 α が大きくなれば波が港内へ伝播しにくくなると予想されるが、実験結果でも明確にその傾向が現れている。不規則波の結果は規則波とほぼ同様の結果であり、港口幅と同じく有義波高で整理できる。

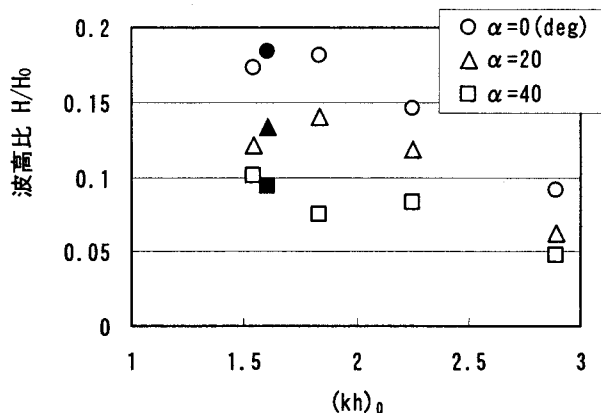


図-4 入射角による波高の変化

(4) 港口面積の影響

図-5には港内面積による影響について検討した結果を示した。Type1の模型で港内岸壁(図-2のType1)の位置を変更することで港奥行きを1.3m、1.5m、2mとした。港内面積が $A_w = 0.5$ と $A_w = 0.7$ ではほとんど差は見られないが、 $A_w = 0.35$ の場合は波高が大きくなっており、港内面積が特に小さくなると波の減衰効果が小さく波高が大きくなると推測される。解析においても減衰効果を考慮しなければ、このような傾向は評価できないと考えられる。

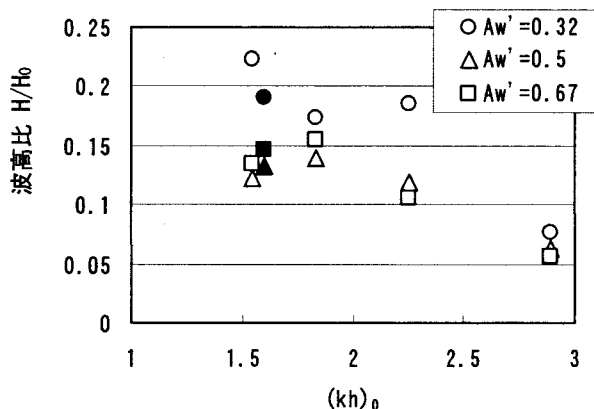


図-5 港内面積による波高の変化

3. 海水交換機能の検討

(1) 実験の概要

海水交換機能についてはType1とType3の模型について検討を行った。図-6に示すように、各々の形状について越波型の通水路防波堤を前面と側面の2個所に配置した。実験では、前面通水路を開口した場合と側面通水路を開口した場合の2ケースについて実験を行った。

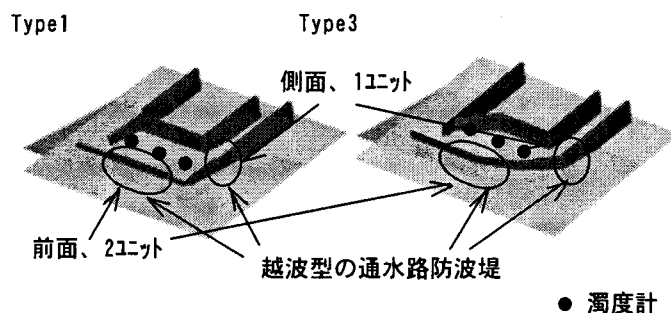


図-6 海水交換型防波堤の実験模型

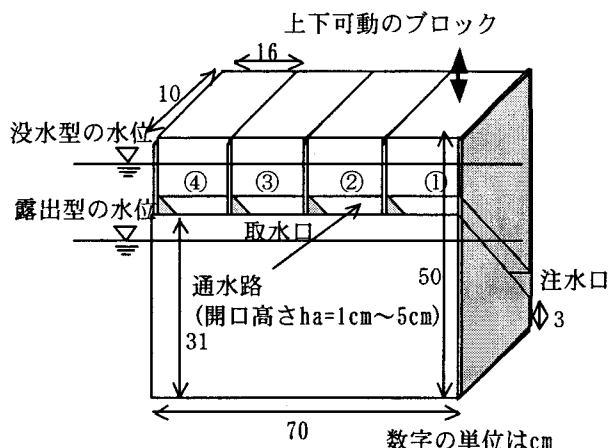


図-7 通水路型防波堤の模型

図-7には越波型の通水路防波堤の模型²⁾を示した。通水路の取水口が静水位より上位に位置しており静穏時には港外と港内の水は遮断されているが、波動により取水口を越波した港外の水が港内へ流入する。港内の注入口を底部に配置することで、波の透過を効率的に遮断する構造となっている。1ユニットは4つのブロックから構成されており、開口する高さや組合わせを変更できる。側面に配置する模型は取水口を水位に合わせて低く設置している。

表-3 実験模型の条件

実験ケース	模型形状	越波型通水路防波堤の配置
CASE1	Type1	前面, 8'ブロック, 5cm開口
CASE2		側面, 4'ブロック, 5cm開口
CASE3	Type3	前面, 8'ブロック, 5cm開口
CASE4		側面, 4'ブロック, 5cm開口

実験条件を表-3に示した。また、入射波の条件を表-4に示した。実験では、港内にトレーサとなる溶液を投入し、港内の濁度の変化から海水交換機能を評価した。トレーサにはカオリンを使用し、吸着や沈殿を防ぐために分散材として硝酸ナトリウムを使用した。カオリンを使用したのは比重が極めて水に近く、沈降や密度流れが無視できるためである。実験の手順は以下の通りである。

計測は図-1の波高計に加えて、越波型の通水路防波堤

の前面に波高計を1本と港内に濁度計を3個所配置した。濁度計は各個所の中央水深に設置している。

表-4 波の条件

	周期 (秒)	波高 (cm)	入射角 (deg)	水深 (cm)
規則波	0.8 1.0 1.2	4~7	20	沖側 35
不規則波 (Bretschneider-Mistuyasu)	1.0 (平均)	4 (平均)		港内 30~15

(2) 実験結果

図-8には港内に配置した濁度計の変化の1例を示した。港口部から順に濁度計の結果をA, B, Cで示した。横軸は造波を開始してから経過時間、縦軸はトレーサ溶液を投入した初期濃度 C_0 に対する濃度比 $Cr (=C/C_0)$ を表している。CASE2のType1で側面に通水路防波堤を配置した結果を示した。港口部に近いA点から順に濃度が低下する結果となっているが、3点に大きな差は見られずほぼ同様の変化を示しており、港内の濃度はほぼ一様に低下している。

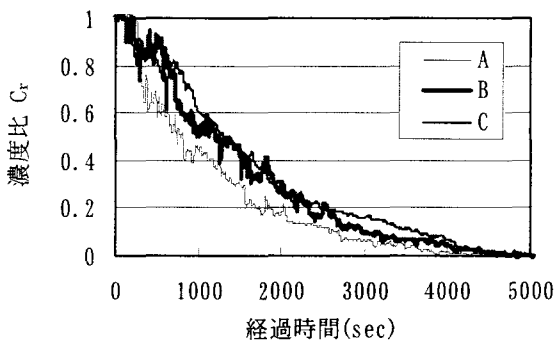


図-8 港内濁度の変化
(Type1、側面、 $T=1.0$ sec)

水交換機能を評価するために、通水路から越波流入量を次式の横越流に関するForchheimerの式³⁾を応用した。

$$Q_w = C_w L_w \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right)^{3/2} \quad (1)$$

ここで、 Q_w は横越流量(m^3/s)、 $C_w (=1.901m^{1/2}/s)$ は流量係数、 L_w は堰の幅、 h_1, h_2 は堰の上下流における越流水深(m)である。

Forchheimer式は定常状態を仮定しているため本実験のような波動による横越流にそのまま適用できないが、その適用方法については既に検証している²⁾。図-9のような時間波形を考えた場合、1周期間の越流量 Q_w は図の斜線部となる。ここで、 h_c は通水路の下端高さ、 H は波高である。式(1)の越流水深の項を平均水深 h_w で表し、 h_w を式(3)で置き換えることで通水路からの越流量として表すこととする。 T は波の周期である。波高 H は通水路

前面で測定した波高計の測定値を用いた。

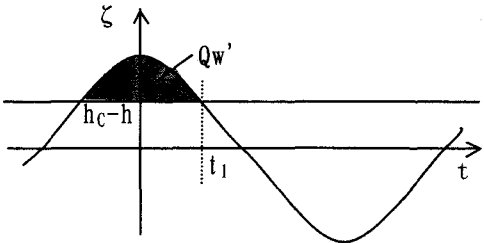


図-9 通水路からの越流量

$$Q_w' = \frac{1}{2\omega} \{ H \sin \omega t_1 - 2(h_c - h) \omega t_1 \} \quad (2)$$

$$h_w = Q_w' / T \quad (3)$$

この横越流式の適用性については、波の入射角が0度~25度までの範囲について既に検証しており、式(1)の流量係数が $C_w=0.4$ となることを示した²⁾。

通水路前面で計測された波高を用いて式(1)から求められる流入量で港内の水交換に要する時間が式(4)で推定できることになる。ここで、 V は港内の水量である。

$$t_w = V / Q_w \quad (4)$$

式(4)を代表時間として濃度低下に要した時間を整理することで水交換機能を評価することができる。

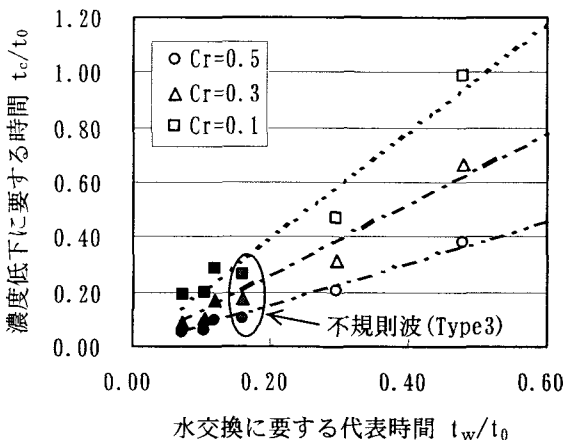


図-10 代表時間の相関(前面)

図-10には前面に通水路防波堤を配置した場合の代表時間の相関、図-11に側面に通水路防波堤を配置した場合の代表時間の相関を示した。白抜き印がType1の結果、塗りつぶしがType3の結果である。横軸は式(4)から求められる代表時間であり、縦軸は3点の濁度計の平均値について、濃度比 Cr が0.5, 0.3, 0.1に低下するまでに要した時間を表している。縦軸と横軸の時間は規準時間として、Type1で通水路防波堤がない場合に濃度比が0.3に低下するのに要した時間 $t_0 (=9000$ 秒)で無次元化している。濃度低下の時間が代表時間との差が小さいほど効率的に水交換が行われたことを示している。実験結果では

$Cr=0.1$ の場合で代表時間の2倍程度の時間を要していることがわかる。図-10の結果では、Type3に比べType1は入射波高が小さかったため比較が難しいが、ほぼ同様の相関性を示している。また、不規則波については、有義波高について規則波と同様に整理した結果を示したが、ほぼ規則波と同様の相関性が見られる。図-11の側面に通水路防波堤を配置した結果でも模型のタイプによる顕著な差異は見られない。濃度比が小さいほどややばらつきが大きい、一定の相関性は認められる。

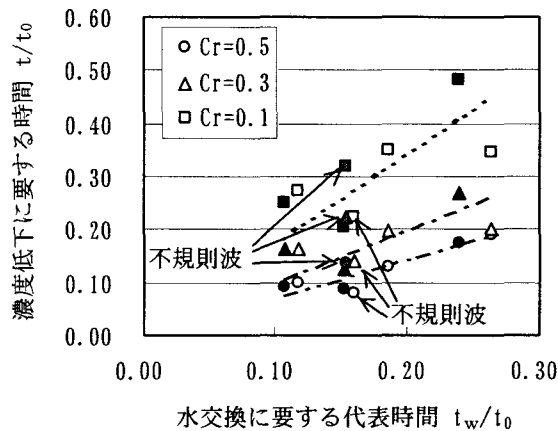


図-11 代表時間の相関(側面)

表-5には濃度比ごとの代表時間に対する濃度低下時間の比(相関直線の勾配)を示した。前面と側面で大きな差異はないが、側面の方がやや小さく水交換の効率が僅かながら良い。前面の場合は通水路防波堤が港口に近いため、側面に比べて効率が低下していると推測される。

表-5 代表時間に対する濃度低下時間の比

	$Cr=0.5$	$Cr=0.3$	$Cr=0.1$
前面	0.76	1.30	1.95
側面	0.72	0.99	1.72

(3) 潮汐実験の結果

現地では潮汐によっても海水交換を期待できるが、潮汐の効果を考察するために、模擬的に水位変動を与える実験を行った。表-6に実験条件を示した。

表-6 潮汐の実験条件

模型形状	通水路防波堤	水位差(cm)	周期(秒)	波数
Type1	なし	3, 6	2400	3
	前面, 87° ロック, 5cm開口	3, 6		

図-1の水槽において、T点から水の給水と排水を行うことで水槽全体の水位を変動させることで潮汐を模擬した。実験模型のスケールは1/50程度を想定しているので、

潮汐の実験での周期は100分程度と考えられるが、実験時間は周期を半分程度に短縮した。水位差は日本沿岸で見られる潮位差から設定した。

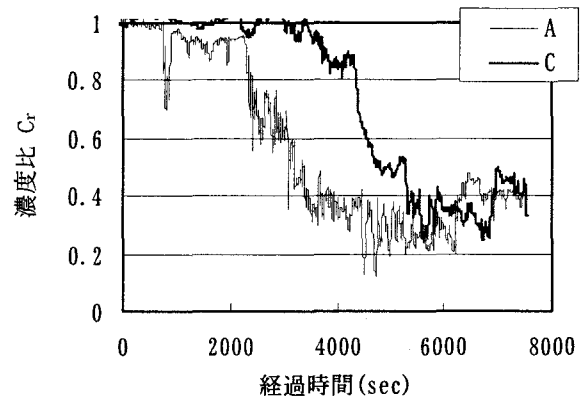


図-12 港内濁度の変化(通水路なし)

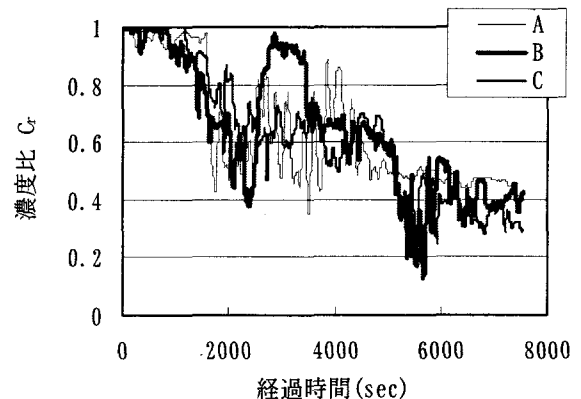


図-13 港内濁度の変化(通水路有り)

図-12、図-13に水位差3cmで通水路防波堤が無い場合とある場合の結果を示した。7000秒程度では通水路の有無による差はあまり見られないが、初期の低下は通水路有りがやや早い。また、通水路が有る場合は計測点によるばらつきが小さいが各点での時間変動は大きい。これらのことから、潮汐に対して通水路の有無によって港内への流入流出量は変わらないため、水交換効率には大きな影響はないが、出入り部が増加するため港内の攪拌が促進されていると考えられる。

また、実験では3波のみであったため濃度は十分低下していないが、小規模な港湾であれば日本沿岸で見られる潮差でも数日で港内の海水が交換されると推測される。

4. 解析的検討

(1) 波変形の解析結果

解析には緩勾配方程式法による数値解析⁴⁾を用いた。解析にあたっては、実験水槽全体を解析領域として境界条件は実験水槽と概ね一致させた。実験結果と同様の纏め方をしたが、解析結果では計測ポイントだけでなく港内全域の2乗平均和についても合わせて表示した。

図-14には波の入射角の影響についての解析結果を示した。白抜き印が計測ポイントの平均値で塗り潰しが港内全体の平均値である。また、実験結果を実線で示した。計測ポイントと全体の解析結果はほぼ同様の値であり計測ポイントで港内全体の傾向が把握できることがこの結果からもわかる。また、入射角が大きいほど港内の波高が大きくなる傾向は実験結果と同様に明確に現れている。実験結果と大きな差はみられないが、最も入射角が小さく波が港内に伝播しやすい場合に比較的差が大きい。

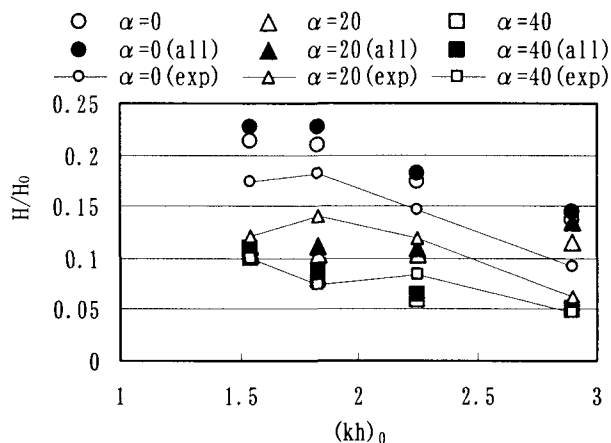


図-14 入射角による波高の変化

(2) 潮汐の解析結果

解析には平面場の海浜流方程式と拡散方程式による数値解析⁴⁾を行った。通水路型防波堤の領域にダルシー則を用いるなど、流れと拡散の解析手法はすでに提案している⁶⁾。解析条件は図-12の実験条件同様に図-1のT点付近の境界に水位変動を与えて計算を行った。なお、港内のスロープの影響は小さいと考えて省略した。

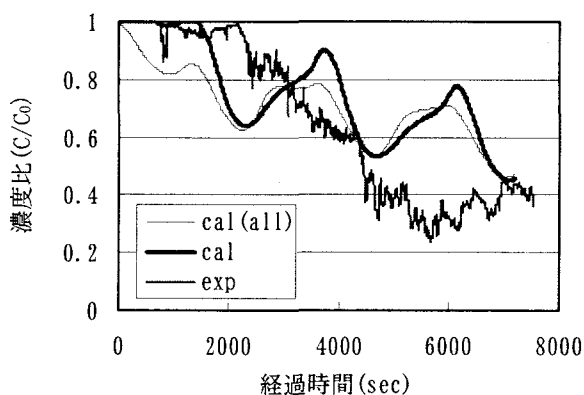


図-15 港内濁度の変化

図-15には、潮差を3cmとした場合（通水路型防波堤なし）の解析結果と実験結果を示した。解析結果は港内と測点の平均値を示したが、港内平均値は初期に比較的最早い濃度低下が見られるなど測点の平均値と時間変化にややずれが見られるが大きな差異はない。実験結果と比較

すると、水位変動の周期に応じて濃度も周期的な変動を示しながら徐々に低下しており、分散効果が小さい。このため、後半部分の濃度に差が生じている。

図-16には水位上昇時の港湾模型周辺の流速図を示した。港口付近の流入部で流速が大きくなっており、港内への流入状況が確認できる。

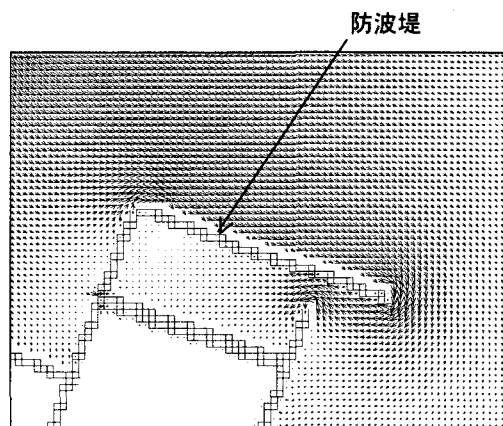


図-16 港湾周辺の流況

5. 結論

本研究では、一定フレキシブルに形状を変更できる港湾模型を用いて、港内の静穏度と海水交換機能について防波堤等の外郭施設の配置による影響を検証した。港湾模型のスケールは代表長さが沖波波長の2~4倍という小さな港湾が対象ではあるが、港口部の幅や形状、水域面積の影響が確認できた。また、海水交換型防波堤は港奥部に配置する方が効率良く、通水路の開口率と波高から求まる代表時間によって港内水の交換に要する時間が推定できることが確認できた。港内の静穏度については解析的にも検証が可能であることもわかった。今後は、海水交換機能についても解析的に検証できるような解析手法の開発が課題である。

潮汐による海水交換の効果については、実験と解析結果から小規模な港湾では日本沿岸で見られる潮差でも海水交換の効果が期待できることがわかった。

参考文献

- 1) 森田修二, 出口一郎, 尹晟鎮: 透過性防波堤を有する小規模港湾の海水交換機能に関する研究, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 351~356, 2001
- 2) 森田修二, 尹晟鎮, 出口一郎: 通水路型防波堤の波動による海水交換機能に関する研究, 海洋開発論文集, 第18巻, pp. 521~526, 2002
- 3) 土木学会, 水理公式集, pp. 294, 1985
- 4) 渡辺晃, 丸山康樹: 屈折・回折・碎波減衰を含む波浪場の数値解析法, 海岸工学講演会論文集, 第31回, pp. 103~107
- 5) 森田修二, 出口一郎, 尹晟鎮: 透過性防波堤を有する小規模港湾の海水交換機能に関する研究, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 351~356, 2001