

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

STUDY ON ABILITY OF PERMEABLE BREAKWATER TO EXCHANGE WATER IN A SMALL HARBOR

森田修二¹・出口一郎²・尹 晟鎮³

Syuuji MORITA, Ichirou DEGUCHI and Seongjin YOON

¹正会員 工博 (株)奥村組 情報システム室 (〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

²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)

³工修 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)

The authors have already shown that breakwaters with slope channel and step channel effectively reduce transmitted wave height when compared with a straight channel, and the flow rate through the breakwater with channel can be estimated from the non-linear Darcy's law.

In this study, the authors examined the ability of the breakwater with channel to exchange water in the model harbor in a three-dimensional wave basin. The authors also proposed numerical model for predicting the rate of water exchange in the harbor and the applicability of the proposed model was also examined using experimental results. The time required to change whole water in the harbor can be estimated from the water volume in the harbor, the representative longshore current velocity, and the opening ratio of the channel in the breakwater.

Key Words : *Exchange of water, Breakwater with channel, slope channel, straight channel, non-linear Darcy's law*

1. まえがき

著者らはこれまで閉鎖性水域となる小規模な港湾における港内の水質改善・維持を図ることを考えて、通水路を有する透過性防波堤の波の遮蔽性や通水特性に関する研究を行ってきた。一般に、波の遮蔽と海水の交換は相反する課題であり、透過性防波堤を適用するには波の透過性と海水交換機能の両面を検討する必要がある。浮体式や潜堤は海水交換には適するが、波の遮蔽性には問題があることから、著者らは通水路型の防波堤に着目した。通水路型の中でも、単なる水平型よりスロープ型やステップ型の通水路を有する防波堤が波の遮蔽性に優れていることを示し^{1) 2)}、通水特性についても検討してきた³⁾。

一方、港湾全体の防波堤の配置を考えた場合、港湾の静穏性を考慮すると、これらの通水路型防波堤は部分的に配置されることが予想される。したがって、港内の海水交換量を評価するためには、防波堤

周辺の流況を考慮した検討が必要と考えられる。これまでも海浜流や潮流を模擬した一様な定常流れ場における研究も行っているが、本研究では、波と流れ場における模型実験と数値解析によって海水交換機能を検証した。

2. 実験の概要

(1) 実験の目的

本研究で考案した通水路型防波堤の通水特性については、2次元水槽の実験結果から非線形ダルシー則を用いて評価できることを確認した³⁾。このことにより、通水路の開口率やその配置設計を行うために通水路の実形状をモデル化した3次元の流況解析を行わずとも、鉛直方向に積分した平面的な解析によって港内外の流況が予測できると考えられる。

一方、現地の港湾内外の流況を考えると、港湾の形状によっては水の流れが活発な水域や逆に水が淀

んだ水域が発生する可能性がある。また、水質の変化は汚濁物質の移流と拡散によって生じるものであることを考慮すると、流況の予測結果だけでは港内の水質を評価することは難しいと考えられる。本実験の目的は、港湾模型を用いて波と流れ場において通水路型防波堤を通してどの程度の水交換機能が期待できるか検証することであり、実験では懸濁物質を利用して濁度の変化を測定するものである。

(2) 実験装置

図-1に示すように平面水槽内(13m×10m)に港湾模型を配置し、通水路型防波堤による水交換量を把握する実験を行なった。水深は沖側で33cmであり、入射波に対して20°の入射角を持つようにした1/10の勾配の固定床上に港湾の模型を設置した。港湾内の水深は一様に15cmにした。

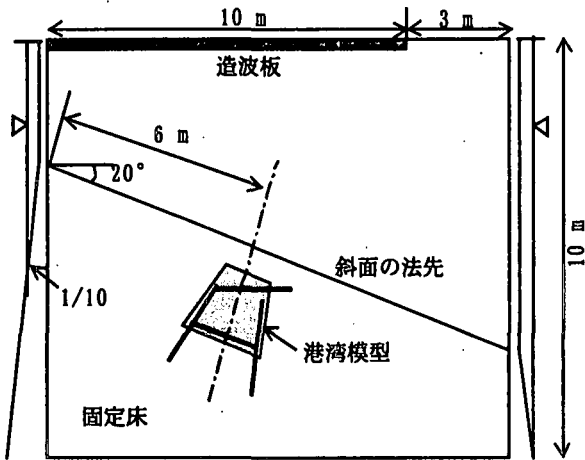


図-1 実験に用いた水槽の概要

図-2には、港湾の模型(2m×1.5m)と計測器の配置を示した。模型は1/50程度のスケールを想定している。港湾の両側面には通水路型防波堤を配置したが、通水路型防波堤にはスローブ型と水平型のものを製作した。固定床上に発生させた沿岸流を利用して港内に外水を導入して港内の水交換を図ろうとしたものである。港内に懸濁物質を投入し港内濁度の変化から水交換量の評価を行なった。懸濁物質にはカオリナイトを用い、分散剤を添加して沈降や付着を防止した。通水路の開口率や流速と濁度の低下速度の関係から通水路型防波堤の水交換機能の定量的な評価を試みた。波高の測定には容量式波高計を用い、濁度には光学式濁度計、流速は2成分の電磁流速計を用いた。なお、防波堤からの反射波を低減するために、前面の防波堤には消波ブロックを配置した。実験では、スローブ型通水路と水平型通水路を有する防波堤の模型を用いて実験を行う。

図-3には、実験に用いた通水路型防波堤のスロー

ブ型の模型を示した。水路を4つのブロックに分割し、上部の堰を上下することで通水路の高さが1cm～5cmまで1cm間隔で調整できるように製作した。下部の堰を固定しているので、通水路の高さに応じて中心高さも変化する。

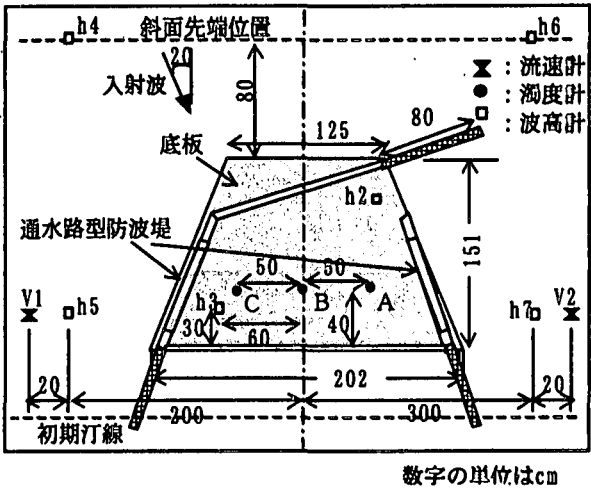


図-2 港湾模型の概要

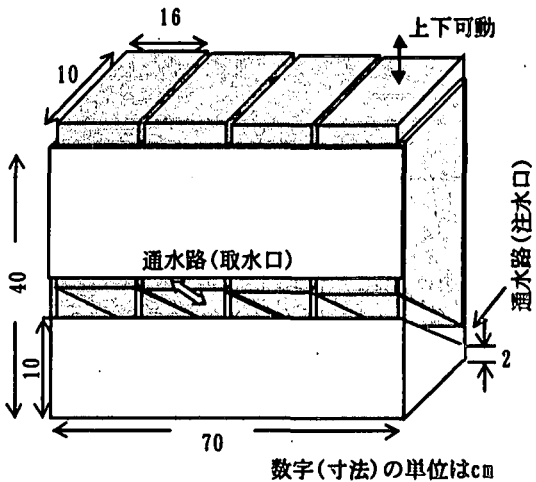


図-3 通水路付き防波堤の模型 (スローブ型)

スローブ型の場合は、通水路の取水口の中心高さが水底から $h_{in}=10.5\text{cm}\sim12.5\text{cm}$ 、注水口の中心高さが水底から $h_{out}=2.5\text{cm}\sim4.5\text{cm}$ となり、水平型の場合は、 $h_{in}=7.5\text{cm}\sim9.5\text{cm}$ となるよう製作した。なお、通水路が4つのブロックで区切られているので、水槽に設置した状態で汀線側からNo. 1～No. 4と番号付けを行い、以降はこの番号を呼称とする。

(3) 実験の条件と手順

実験には規則波を用いたが、周期を1秒と0.8秒の2種類とし、入射波高は4cm～10cmの範囲で変化させて通水路の開口率も変化させることで港内への導入水量を様々に調整した。

実験の手順は、以下の通りである。

①港湾模型の通水路および港口を全て閉口した状態で、港内に懸濁物質を投入し十分に攪拌して港内の濁度を一様にする。

②港内が静水状態になった段階で、港口および通水路を開口し同時に造波を開始する。

③港内の濁度と波高、周辺の波高と流速を測定し、港内の濁度が初期状態にまで低下した時点で造波を止めて実験を終了する。造波した時間は1時間～2時間程度であった。

計測項目は、濁度と波高、流速である。濁度は図-2に示したように港内の3点で測定したが、測定した水深は7.5cmで中央の水深にあたる。中央の濁度を測定することで、ほぼ該地点の平均的な濁度が測定できることは確認している。

波高は造波板の近傍(h1)と港内(h2, h3)、港湾周辺(h4～h7)の7箇所測定した。なお、図-2のh5, h7の2点は一定時間間隔で岸沖方向に移動させて碎波点近傍の波高分布を測定した。

流速は波高計のh5, h7と同様に、岸沖方向に移動させて流速分布を測定した。また、通水路の注水口付近の流速も測定した。

3. 実験結果

(1) 波高

図-4には、波高の経時変化(h5, h7を除く)の1例を示した。波の周期がT=0.8秒の結果である。5分間隔に測定した60波程度の波高の平均値を示した。

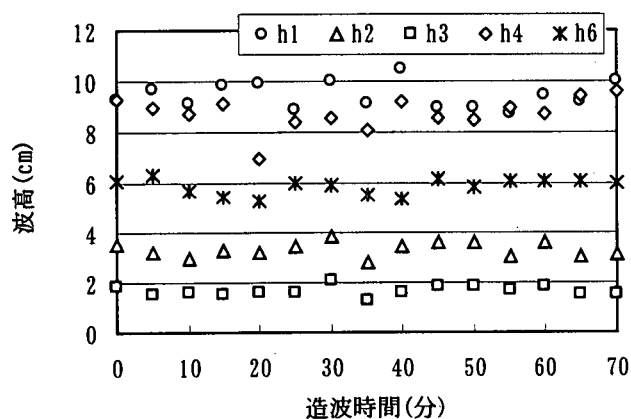


図-4 波高の経時変化

横軸は造波を始めてからの時間(分)、縦軸は波高である。多少の変動は見られるが、ほぼ定常的な値を示しており、水槽内の反射波の影響は小さい。h1は造波板近傍の波高であり、ほぼ入射波高を表していると考えられる。h2, h3は港内の波高であり、

港外に比べて静穏になっていることがわかる。

図-5には、h5, h7の波高計によって測定された碎波点の波高について、合田によって求められた碎波限界における波高水深比(海底勾配1/10)と比較したものである。波の周期がT=0.8秒の結果を白抜きの丸印で、周期がT=1.0秒の結果を黒塗りの丸印で示した。ここで、 H_b , h_b は碎波限界の波高と水深、 L_0 は沖波波長である。ばらつきは大きい、合田の結果を中心に分布していることがわかる。なお、波の周期による差はあまり見られない。

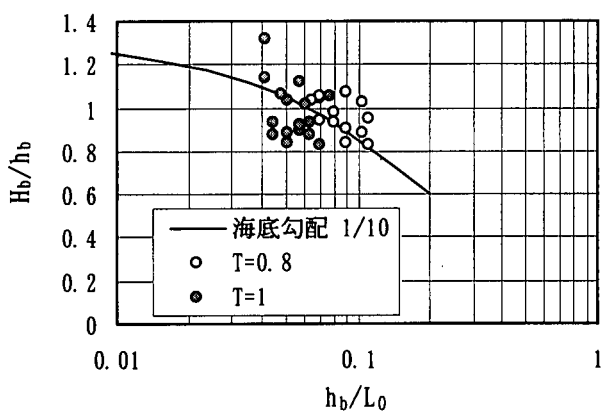


図-5 碎波限界の波高水深比

(2) 流速

図-6は碎波帯付近の沿岸流速をLonguet-Higginsが示した流速⁴⁾と比較したものである。図-2に示したように、V1は港湾模型の上流側(沿岸流の方向から見て)で測定された流速、V2は下流側で測定された流速である。横軸は汀線からの距離で、碎波点までの距離 x_b で除した値である。縦軸は沿岸流速で、次式で表される碎波点の流速で除した値である。

$$v_b = (5\pi/8)(ri/f)gh_b(\sin \alpha_b/c_b) \quad (1)$$

ここで、 r は実験係数で $r=0.4$ 、 i は海底勾配、 g は重力加速度、 f は摩擦係数でEaglesonの次式⁵⁾を用い、粗度高さ k は滑らかなコンクリートに相当する $k=0.03\text{cm}$ を用いた。

$$f = \left[2 \log_{10} \frac{h_b}{k} + 1.74 \right]^{-2} \quad (2)$$

図-6の実線はパラメータ $P=(\pi/2)(iN/mf)=0.3$ の結果を表し、実験結果を白丸(T=0.8)と黒丸(T=1.0)で表している。上流側の実験値(V1)とLonguet-Higginsの値を比較すると、実験値の方が流速が小さくなっている。港湾模型から2m程度離れた地点で測定したが、目視でもやや模型からの反射波の影響が見られたので、流速が小さくなったのは反射波の

影響と考えられる。流速の分布を見ると、計測器の問題から流速のピーク値を捕捉することはできなかったが、砕波点よりも汀線側に流速のピークが存在するような傾向は実験値からも見られる。なお、波の周期による差は見られない。

下流側の実験値(V2)を見ると、上流側と比較してかなり小さくなっている。目視による下流側の流況は、港湾模型の背後では回折波の影響で逆向きの渦が発生している。したがって、V2の位置では沿岸流が十分に生成されていないと考えられる。

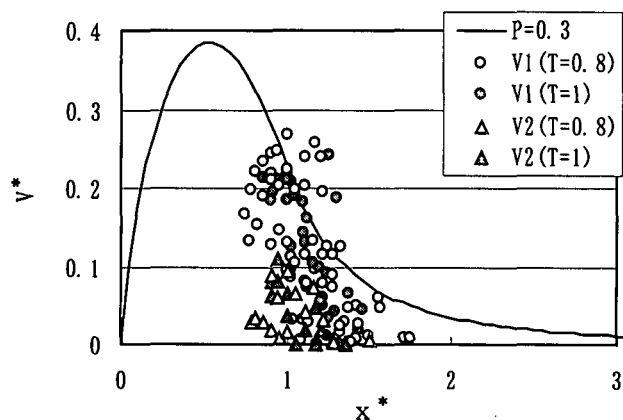


図-6 砕波帯付近の沿岸流速

(3) 濃度

図-7、図-8には、港内濃度の経時変化を示した。図-7は通水路が水平型の防波堤模型を用いた結果で、図-8は通水路がスロープ型の結果である。いずれも港湾模型の両側の通水路型防波堤について、No. 1とNo. 2のブロック(汀線側の2ブロック)を2cm開口した場合の結果である。波の周期は $T=1.0$ 秒で入射波高はほぼ6cm程度であった。横軸は造波を始めると同時に港口や通水路を開口してから時間であり、縦軸は各測点における初期濃度(懸濁物質投入時)に対する濃度比である。

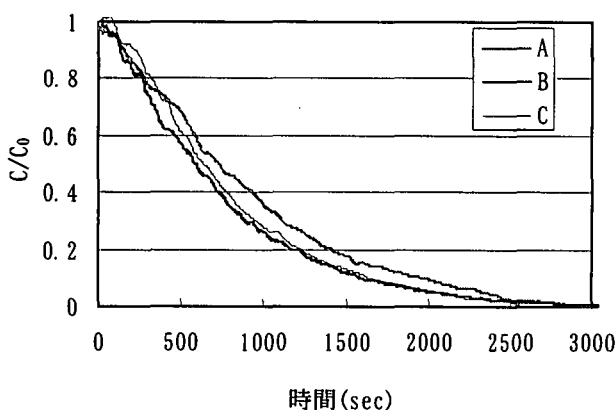


図-7 港内濃度の変化(水平型)

いずれの結果も測点による濃度のばらつきは小さく、ほぼ平均的に低下している。この傾向は全ての結果に共通している。スロープ型の濃度低下が若干速く進んでいるようであるが、他の結果も踏まえて評価するとほぼ同様な結果であった。

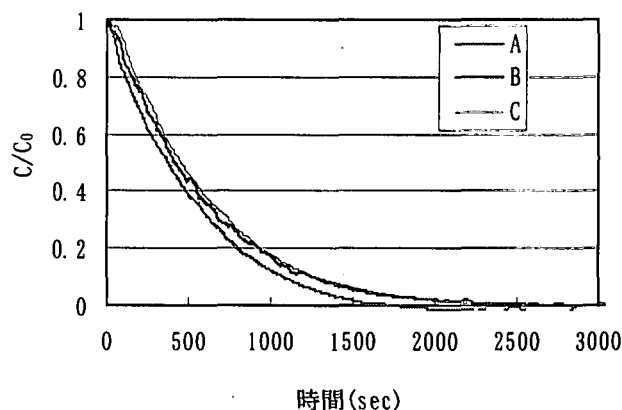


図-8 港内濃度の変化(スロープ型)

(4) 水交換機能の評価

図-9には、水平型通水路の結果について、通水路の通水性から求めた港内水の交換に要する代表時間と濃度低下に要した時間の相関関係を示した。水交換に要する代表時間とは、通水路(上流側)の開口面積 A と代表流速 u の積の流量 $Q(=A \times u)$ と港内水量 V から、 V/Q で表される時間である。すなわち、通水路からの流入流量に対する港内水量の比が港内の水を全て交換するのに必要な時間を表すと考えて、その1つの指標を評価したものである。なお、代表流速にはLonguet-Higginsによる水平混合を無視した砕波点の沿岸流速(式(1))を用いて、汀線から2m幅の平均値を代表流速とした。図中の印は3測点の平均濃度比が0.5、0.3、0.1にまで低下する時間を表しており、実線はその近似直線である。なお、通水路を閉じた状態で平均濃度比が0.1に低下するのに要した時間 t_0 (100分)で無次元化している。

この実験では、代表時間が0.01以下の小さい範囲では、相関性や線形性は不明である。実験で得られた範囲では、いずれの濃度でも良い相関が見られ、このような評価手法でも港内水の交換時間が推定できることがわかった。また、この結果は波の周期が $T=1.0$ 秒と $T=0.8$ 秒の両方を合わせて示したが、特に大きな差は見られない。白抜きの印は全て、上流、下流ともにNo. 1、No. 2の通水路を開口した場合の結果であるが、黒塗り印は、上流側の通水路のみNo. 3とNo. 4の通水路を開口した結果である。濃度の経時変化の結果では、測点によってばらつきが見られる傾向はあったが、平均濃度で評価すれば、濃度の低下速度にほとんど差が見られない。

図-10は図-9と同様に、スロープ型の結果を示したものである。スロープ型は水平型に比べて、ややサンプル数が少ないが、水平型とスロープ型に顕著な差は見られない。

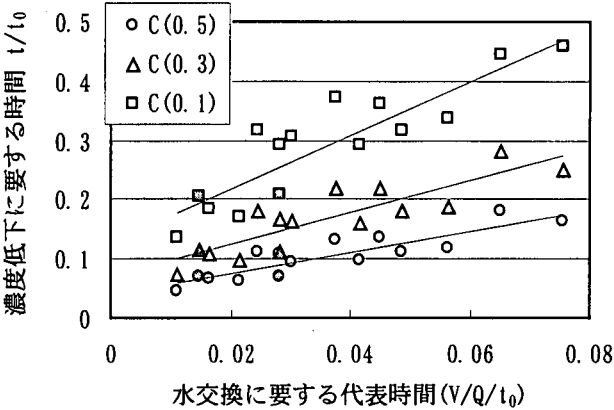


図-9 代表時間の相関(水平型)

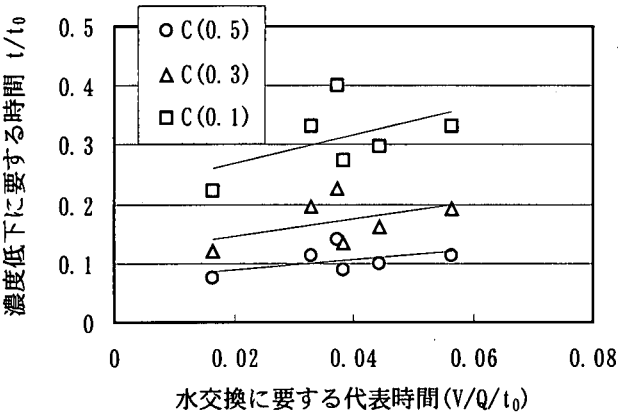


図-10 代表時間の相関(スロープ型)

4. 解析的検討

(1) 解析手法

本研究では、現地における流況を予測するために数値解析を行う。波変形は緩勾配方程式に差分法を適用し、流れの場は次式の海浜流方程式にADI法を適用する。ここで、 ζ は平均水位変動、 u, v は x, y 方向の流速、 h は水深であり、 S_{xx}, S_{yy}, S_{xy} はラディエーション応力、 τ_x, τ_y は x, y 方向の底部せん断力、 L は渦動粘性係数である。底部せん断力や渦動粘性係数については本報では渦動粘性係数にJames⁶⁾の式を用い、底部せん断力は樁木ら⁷⁾の式を用いる。ラディエーション応力は(6)式から求めたが、添字の i, j は x, y 方向の成分を表し、 E は波のエネルギー、 k は波数、 c_g は群速度、 δ はクロネッカーである。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} + \tau_x \right) \\ + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - L \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \tau_y \right) \\ + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$S_{ij} = E \frac{c_g}{c} \frac{k_i k_j}{k} + E \left(\frac{c_g}{c} - \frac{1}{2} \right) \delta_{ij} \quad (6)$$

通水路の通水特性については、非線形のダルシー則で評価できることは実験的に確認³⁾しており、海浜流方程式に非線形のダルシー則の領域を混在させるHybrid型の解析手法³⁾もすでに提案している。

ADI法に適用するには、流速を水位勾配の1次式で表す必要がある。実流速を任意の水位勾配におけるmulti-linearの近似式によって表せば、(7)式で表される。通水路型防波堤の領域では(4)式あるいは(5)式の運動方程式の代わりに(7)式を適用する。

$$q = k_a \xi_i + k_b \quad (7)$$

$$k_a = 1 / \sqrt{n^2 + 4m\xi_i} \quad (8)$$

$$k_b = \left(-n + \sqrt{n^2 + 4m\xi_i} \right) / \left(2m - \xi_i / \sqrt{n^2 + 4m\xi_i} \right) \quad (9)$$

$$m = -C_f / g \sqrt{k_p} \quad (10)$$

$$n = -v / g k_p \quad (11)$$

ここで、 q は実流速、 ξ は水位勾配、 g は重力加速度、 v は流体の動粘性係数である。 C_f は乱流係数、 k_p は長さの2乗の次元を持つ透水係数であり、本研究で用いたモデルの係数は表-1のとおりである。

表-1 透水係数と乱流抵抗係数

	水平型	スロープ型
k_p	0.129	0.058
C_f	0.016	0.027

(2) 解析結果

図-11には、港内濃度の経時変化について、解析と実験の比較を示した。波の周期が $T=1.0$ 秒で通水路は水平型で上流、下流ともにNo.1, No.2ブロックを2cm開口し、入射波高が4.5cmの結果を表している。解析結果は、港内全域の平均濃度と実験の測点に該当する3点の平均濃度を示した。解析の港内平均濃

度は実験結果とほぼ一致しているが、測点濃度は低下がやや速い。解析結果では、測点濃度の方が港内濃度よりも低下がやや速い傾向が見られた。この原因は明確ではないが、解析では港内のゆっくりとした循環流は再現できておらず、通水路に近い領域から濃度が低下しており、実験との差が生じている。したがって、実験の測点濃度は解析結果の港内平均濃度に近いとも考えられる。

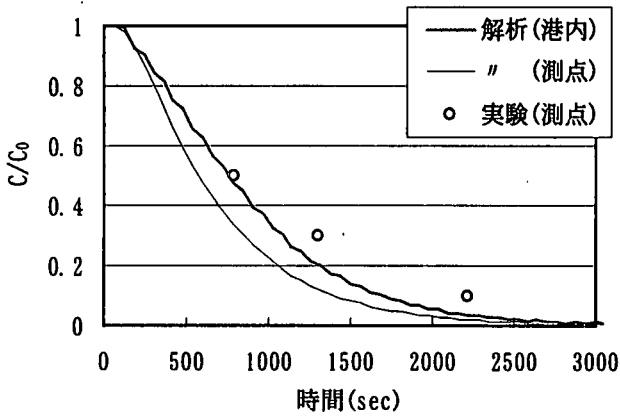


図-11 濃度変化の比較

図-12には、解析による港湾模型周辺の流況の1例を示した。港湾の上流側では沿岸流が迂回するとともに僅かながら通水路型防波堤から港内に流入している。一方、下流側では渦が発生して逆向きの流れが生じ、下流側からも通水路型防波堤の一部から流入している。これらは目視した実験状況とよく一致している。

5. 結論

本報では、海水交換機能を有する通水路型防波堤を配置した港湾模型を用いて、波と流れの場での程度の水交換が期待できるか実験によって検証した。通水路には単に水平にしたものと本研究で考案したスロープ型の通水路を対象とした。

港内の水交換量を懸濁物質の濃度変化で評価するために長時間の造波実験が必要となった。沿岸流を発生させるために平面水槽内に緩傾斜の固定床を設置して実験を行ったが、波高の測定結果からは特に問題となるような反射波は生じていなかった。港湾模型の近傍の沿岸流速はLonguet-Higginsの示した流速と比較して若干小さな値となっており、模型による反射波の影響が存在するようであった。

港内濃度の変化は、造波とともに順調に濃度低下を示し、港内の3つ測点では特に大きなばらつきも

なく、ほぼ同様な変化を示した。ここで、水交換機能を定量的に評価するために、水交換に要する代表時間(港内への流入流量(推定値)と港内水量から算定)と港内濃度の低下速度に相関関係があることを確認した。この結果から、通水路の開口率と沿岸流速の代表値(例えば砕波点の情報)によって港内の水交換に要する時間が推定できるので、通水路の開口率の決定に参考にすることができる。

また、通水路内の流量も評価した平面場の流れと拡散の数値解析手法を構築した。実験結果との比較から、数値解析によって一定の評価が可能であることを確認したが、実験値と差が見られる場合もあり、解析精度の向上は今後の課題の1つである。

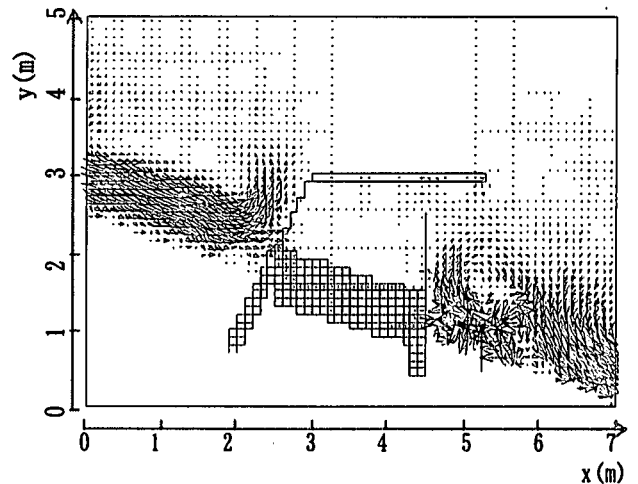


図-12 港湾周辺の流況

参考文献

- 1) 森田修二, 出口一郎: 通水路を有する透過性防波堤に関する研究, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 719~724, 1999
- 2) 森田修二, 出口一郎: スロープ水路を有する透過性防波堤に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1101~1105, 1999
- 3) 森田修二, 出口一郎: 通水路型防波堤の通水特性に関する研究, 海洋開発論文集, 第16巻, pp. 273~278, 2000
- 4) Meyer, R. E. : Waves on Beaches, Academic Press, 1972
- 5) Eagleson, P. S. : Theoretical Study of Longshore Currents on a Plane Beach, M. I. T. Hydrodynamics Lab., Tech. Report, No. 82, 1965
- 6) James, I. D. : A nonlinear theory of longshore currents, Estuarine and Coastal Marine Science, Vol. 2, pp. 207~234, 1974
- 7) 榎木亨ほか: 河口周辺の海浜流及び地形変動モデルに関する研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 411~415, 1984