

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

STUDY ON ABILITY OF BREAKWATER WITH CHANNEL TO EXCHANGE WATER USING WAVE

森田修二¹・尹 晟鎮²・出口一郎³

Syuuji MORITA, Seongjin YOON and Ichirou DEGUCHI

¹正会員 工博 (株)奥村組 技術本部土木部 (〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

²学生員 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)

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)

The authors have already shown the ability of the breakwater with channel to exchange water in longshore current and the breakwaters with slope channel and step channel effectively reduce transmitted wave height when compared with a straight channel.

In this study, the authors examined the ability of the breakwater with channel to exchange water using wave in a wave flume. Three-dimensional and two-dimensional numerical models are also developed for investigating the ability of the breakwater to exchange water. In the model, flow rate through the channel is evaluated using lateral overflow model.

Key Words : Exchange of water using wave, Breakwater with channel, slope channel, straight channel, lateral overflow

1. まえがき

防波堤で囲われた港湾など、閉鎖性水域の水質悪化の問題は以前から取り上げられてきた。その対策の1つとして海水交換型防波堤の研究が行なわれてきたが、コストに対する効果の不明確さもあって、あまり採用されて来なかった。しかし、最近では環境問題が重視されるようになり、施工事例も増えつつある。著者らは海水交換型防波堤の1つとして通水路を有する透過性防波堤について、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、波の遮蔽と海水交換は相反する課題であり、海水交換に適した浮体式や潜堤は波の遮蔽性には問題がある。著者らは通水路型でも、単なる水平型よりスロープ型やステップ型が波の遮蔽性に優れていることを示し¹⁾、通水特性についても検討してきた²⁾。

さらに、港湾全体の中で防波堤の配置を考えた場合、防波堤周辺の流況を考慮した検討も必要であり、海浜流や潮流を模擬した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³⁾。

これまでの研究は港湾周辺の流れを利用した海水交換を期待したものであったが、現地によっては流れを期待できない場合も予想される。本来、波動は水粒子の正弦的な往復運動によるものであるが、本研究では、これまでの通水路型防波堤を応用して、波動を流れに置き換える機構について水理模型実験と数値解析によって検討を行なった。波動を利用した海水交換の機構はスリット型ケーソンなど多くの研究事例が見られるが、本防波堤のメリットは形状が単純であり、コストの低減が図れることにある。

2. 実験の概要

(1) 実験の目的

波動は水粒子の正弦的な往復運動によるものであり、防波堤内に港内と港外をつなぐ通水路を設けただけでは、波動による海水交換の効果は期待できない。本研究で考案したスロープ型の通水路を図-1に示すように配置した場合、波によって通水路を越波する流量だけが港内へ導水される。通水路が静水面

から露出しているために、一旦、通水路内に流入した海水は港内に流れ込み、単なる波動にはない一定方向の流れが発生することになる。このような通水路からの流入流量は、当然ながら水深や波高、波の入射角などに依存することが考えられる。また、通水路内では衝撃的な波の伝播も予想される。本実験の目的は水理模型実験により通水路からの流入流量と港内の静穏度を評価することである。

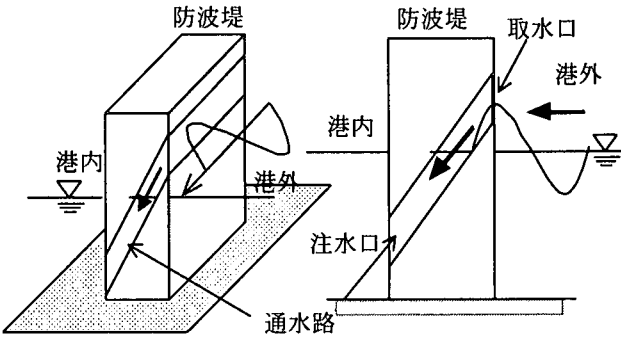


図-1 波動を利用した海水の導入

(2) 実験装置

図-2に示すように2次元水路内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。水交換量の評価は、あらかじめ港口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、造波を開始してからの濃度の低下速度から水交換量を評価した。港内へは通水路からだけ外部の水が流入し、港口からの波の回折も無視できるように、水路を中心で仕切った。長時間の造波が必要なため、反射波を抑えるために透過側や港湾模型の前面に消波ブロックやスロープを配置した。

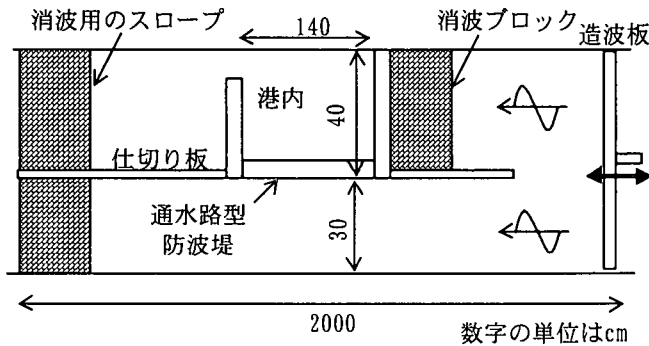


図-2 実験水路の概要(平面図)

図-3には、通水路型防波堤の模型を示したが、水深は通水路の取水側が水面から露出する露出型で3ケースと取水口と注水口ともに水面下にある没水型で1ケースの実験を行なった。1個の防波堤は4つの上下可動のブロックから構成されており、通水路

の高さは1cm~5cmまで調整できるようにした。また、比較のため通水路が水平な模型も製作したが、水平型の通水路の高さはスロープ型の取水口と合わせた。

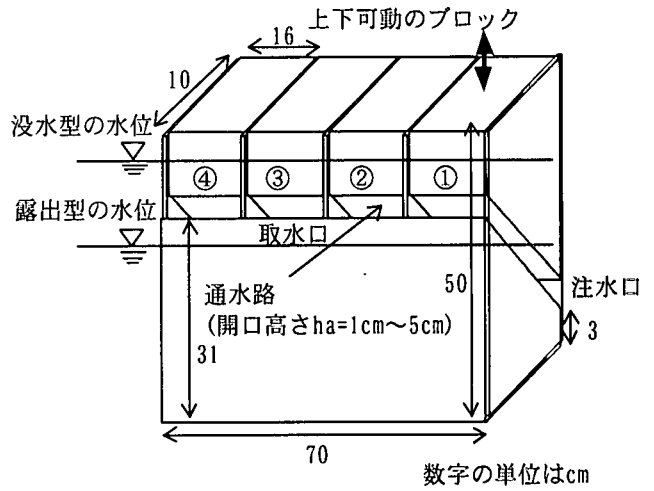


図-3 通水路型防波堤の模型

図-4には、港湾模型の概要と計測器の配置を示した。港内には光学式濁度計を3本、容量式波高計を2本、港口に超音波3成分流速計を1本、港外には波高計を4本(1本は造波板側に)を配置した。波の入射角の影響を確認するために、No.1の防波堤を傾斜させた。傾斜角は20°と25°の2ケースとした。傾斜角は反射波の影響を軽減するように決定した。

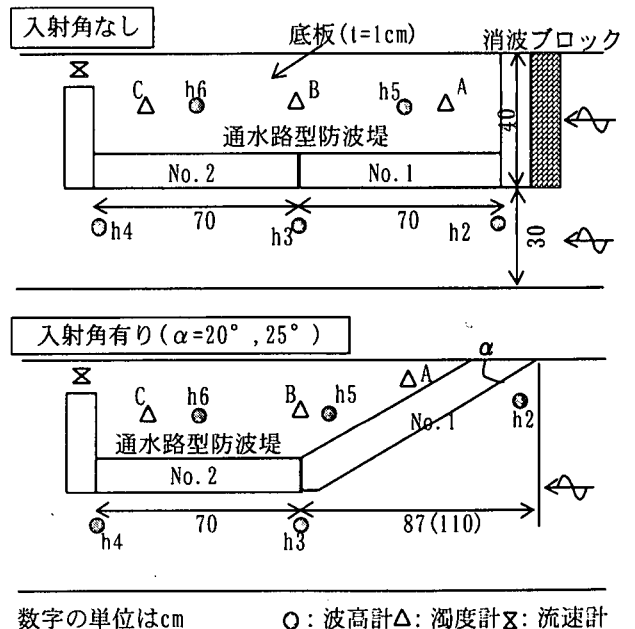


図-4 港湾模型と計測器の配置(平面図)

(3) 実験の条件と手順

実験には規則波を用いて、主に水深と波高の変化による通水路への流入量の変化を確認するようにし

た。周期への依存性はあまりないと推測されたので、主に1.2秒で実験を行なったが、1.1秒と1.4秒についても差を確認した。水理の実験条件を以下の表にまとめた。

表-1 実験の水理的諸定数

	水深 (cm)	波高 (cm)	周期 (sec)	入射角 (degree)
スロープ型	27~29	6~10	1.2	0
	40	各ケースで	1.1, 1.4	20, 25
水平型	28~30	2つの波高	1.2	0
	40			

通水路の下端の高さが31cmであり、水深が27cm~30cmが露出型、40cmが没水型の実験となる。ただし、港内には厚さ1cmの底板を設けているので、水深が港外より1cm浅くなっている。通水路の開口は主にNO.1の防波堤を一樣に開口高さ $h_a=5\text{cm}$ として実験を行なったが、通水路の開口高さや配置による差を確認するために、開口高さを $h_a=2\text{cm}$ にした場合やNO.1とNO.2で1ブロックおきに開口して全体で開口面積を一致させた場合についても実験を行なった。

また、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樣にする。
- 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。造波した時間はおおむね20分~1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-4に示したように港内の3点で測定したが、測定した水深は露出型は13cm~15cm、没水型は20cmで中央の水深にあたる。波高は造波板の近傍(h1)と防波堤側面(h2~h4)、港内(h5, h6)の6箇所測定した。

流速は港口の中心から5cm港内に入った位置で中央の水深で測定した。濁度は実験中は連続して測定したが、波高と流速は10分間隔で測定した。

3. 実験結果

(1) 波高

図-5には、波高の経時変化について1例を示した。スロープ型で水深が28cm、波の周期が $T=1.2\text{秒}$ 、入射角 $\alpha=0^\circ$ の結果である。造波を開始してからの波高の変化を示した。20秒程度で波が到達し、100秒経過するまでにはほぼ定常状態になっている。その

後10分間隔で測定を続けているが、実験の支障となるような波高の大きな変化は見られなかった。港内波高のh5とh6は、港外の波高に比べて極めて小さく、港外の波高はほぼ一樣な波高で安定している。

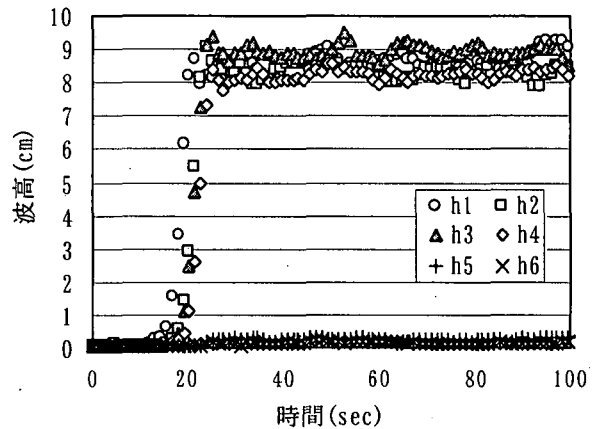


図-5 波高の時間変化

図-6には、沖波波高h1に対する港内の波高比(h5, h6の平均とh1の比)について実験ケースによる比較を示した。凡例の露出型と没水型はNO.1のみ全て5cm開口してNO.2は閉じている。 $h_a=2\text{cm}$ はNO.1のみ2cm開口、半開の $\alpha=20, 25$ はNO.1の②と③のブロックのみ5cm開口した結果である。

港内の静穏度を比較すると、水平型に比べスロープ型が明らかに静穏になっていることがわかる。露出型と没水型では特に顕著な差は見られない。スロープ型で、開口高さが小さい場合は、僅かではあるが波高が小さく、入射角 $\alpha=25^\circ$ の大きい方が波高が大きくなる傾向が見られる。

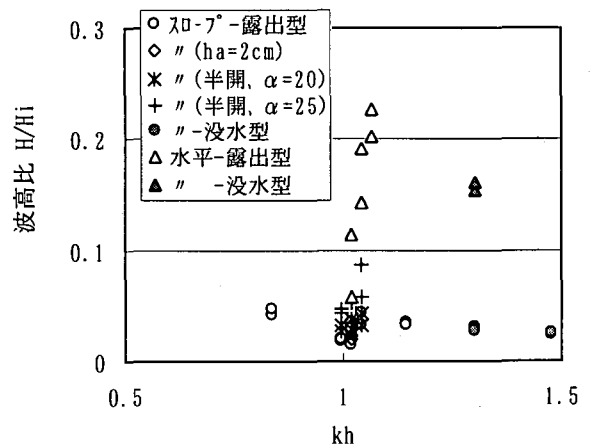


図-6 港内の波高

(2) 濃度

図-7には、港内濃度の経時変化を示した。波の周期は1.2秒で入射波高がほぼ9cmでスロープ型は露出型と没水型、水平型は露出型の結果を示した。防波

堤NO.1のみ5cm開口しNO.2は閉じている。濁度計はA,B,Cの順に港奥から配置しており、濃度の低下は港奥のAから生じている。しかし、測点によって濃度変化に大きな差違はなく、若干の時間のずれが見られるだけである。港内を攪拌するような循環流が生成され、ほぼ一様な濃度分布が形成されていると推測される。スロープ型と水平型を比較すると、この結果のようにスロープ型の方が濃度低下が若干早い傾向が見られた。没水型の場合は明らかに濃度低下が遅く、効果的な水交換が難しいことがわかる。

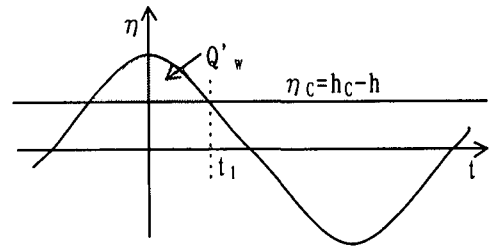


図-8 通水路からの越流量

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

式(1)の越流水深の項を平均水深 h_w で表し、 h_w を次式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。波高は、波高計 h_2, h_3 の平均値を用いた。

$$h_w = Q'_w / 2t_1 \quad (3)$$

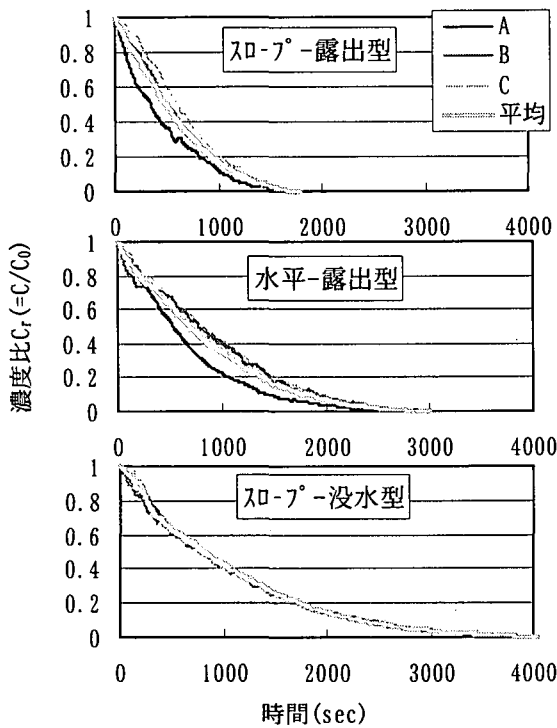


図-7 港内濃度の経時変化

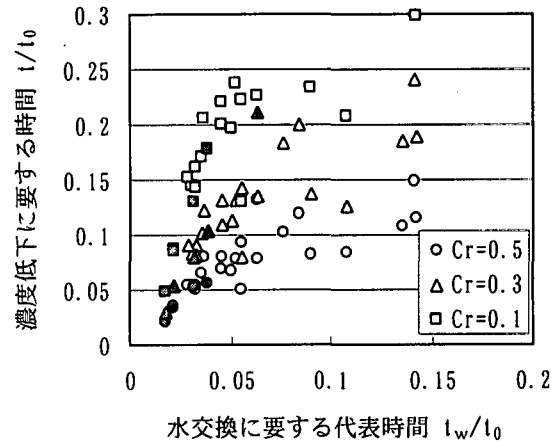


図-9 代表時間の相関(露出型)

(3) 水交換機能の評価

図-9は露出型の防波堤について水交換機能を評価したものである。波形から求めた計算上の通水路への流入量を用いて算出される港内水の水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。ここで、波形から求める流入量は次式の横越流に関するForchheimerの式⁴⁾を応用する。

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

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。式(1)は定常状態を仮定しており本実験のような波動による横越流にはそのままは適用できない。図-8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。

水交換に要する代表時間とは、越流量 Q_w と港内水量 V から、 $t_w = V/Q_w$ で表される時間である。図中の印は濁度計で測定された3測点の平均濃度について、初期濃度に対する比が0.5, 0.3, 0.1にまで低下する時間を表している。なお、通水路を閉じた状態で平均濃度比が0.3に低下するのに要した時間 t_0 (90分)で無次元化している。白抜き印はスロープ型、塗り潰しは水平型の結果である。入射角がある場合の結果も合わせて示した。

結果を見ると、各濃度比においてばらつきはあるものの一定の相関関係が認められる。したがって、波形から求められる計算上の越流量によって、港内の水交換量がある程度は推定できることになる。代表時間と濃度低下時間の相関関係は、濃度比0.1の場合で濃度低下時間は代表時間のほぼ5倍である。この結果から、横越流量の式(1)の流量係数を見直せば $C_w = 0.4$ となる。

また、スロープ型と水平型を比較すると、水平型の相関関係は勾配が僅かながら大きくなっており、水交換機能が劣っているようである。波高の結果も含めて判断すると海水交換型の防波堤としてはスロープ型の方が優れていると言える。

入射角については、角度が大きいほど越流量も大きくなり濃度低下が早くなると考えられるが、今回の実験では確認できなかった。

(4) 流速

図-10には、流速計で測定された港口の流速と、代表平均流速の相関関係を示した。代表平均流速は、先に見直した流量係数を用いて横越流量を算定し、港内への流入量が港口から一様に流出すると仮定して港口の平均流速を算定した。計測値は中央水深の1箇所測定したものである。波動による流速の流れが乱れやすい港口で測定しているため、ばらつきが大きいが一応の相関は認められる。両者の相関関係から濃度の低下速度から評価した流量係数および越流量の妥当性が流速の結果からも確認できた。

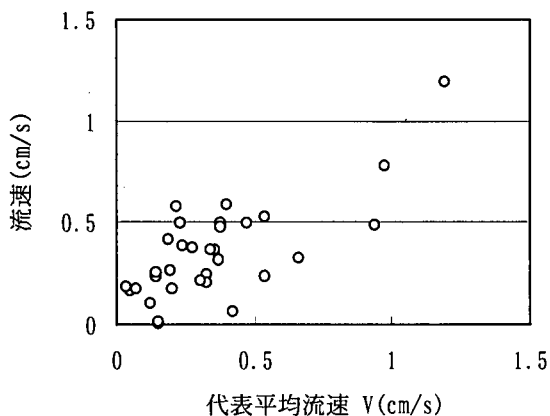


図-10 代表流速の相関(露出型)

4. 解析的検討

(1) VOF法を用いた3次元解析

本実験結果をVOF法による3次元の数値解析手法を用いて検討する。解析には汎用流体解析ソフトSTREAM(株ソフトウェアイト)を用いた。本手法の基礎方程式は、次式で表される質量保存式、運動方程式、VOF関数の保存式である。ここで、 u_i と g_i は x_i 方向の流速と重力加速度、 p は圧力、 ν は動粘性係数、 F はVOF関数、方程式の記述には総和規約を用いた。解析領域は港湾模型を中心に水路の長さを11mとした。造波側の境界には波の水粒子速度を与え、その他の境界は全てスリップ条件とした。図-11に解析モデルを示した。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + g_i \quad (5)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

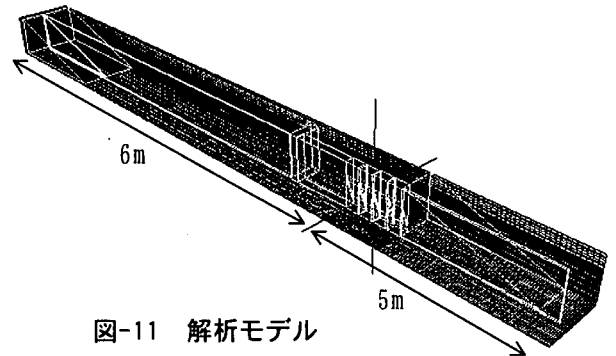


図-11 解析モデル

図-12にはスロープ型で露出型の解析結果の1例を示した。水深が29cm、波の周期が1.2秒、入射波高は6cmの場合で、造波を開始して10秒後の結果である。水面をメッシュで、壁面近くの水路方向の断面流速を矢線で示した。通路から波が伝播して港内に小さな波が生じている様子がわかる。

図-13には、図-10と同様に解析で求めた港口の平均流速と代表平均流速の相関を示した。解析例は少ないが良い相関関係が認められる。しかし、両者の関係は実験と比較して、港口の平均流速の方が大きいようである。この結果は、本手法による数値解析では、越流量を過大に評価する可能性を示している。解析では、反射波の影響があるため短時間で解析を打ち切る必要があるなど、解析精度に課題を残した。

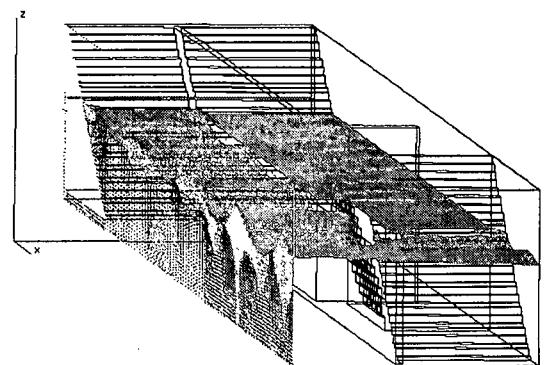


図-12 水面形状と断面流速

(2) 平面2次元解析

現地における解析的な検討を考えた場合、平面2次元による解析手法を検討する必要がある。本研究

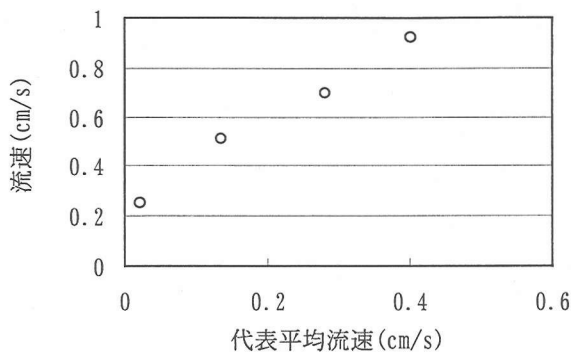


図-13 解析による代表流速の相関

では、緩勾配方程式による波変形解析と海浜流方程式による流れ場の解析を検討した。問題となるのは通水路型防波堤のモデル化である。これまでの研究では、没水型の場合は非線形ダルシー則が適用できることを示し解析手法も既に提案している。露出型の場合は先の実験から検討した流量係数 C_w を用いて、緩勾配方程式における線流量を次式で表す。

$$Q_i = C_w(\eta - \eta_c)\Delta s \Delta t \quad (7)$$

ここで、 Q_i は*i*方向成分の線流量、 η は水面変動量、 η_c は通水路下端に相当する水面高さ、 Δs は差分間隔、 Δt は時間差分間隔である。

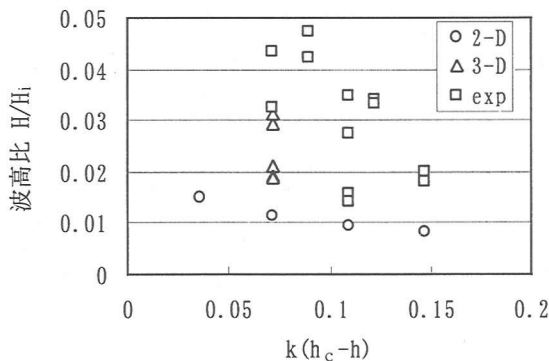


図-14 波高の比較

図-14には、港内波高の計算結果を示した。横軸は波数 k と水深差 $h_c - h$ の積、 h は水深、 h_c は通水路下端の高さ(=31cm)、縦軸は入射波高 H_i に対する港内波高 H の比である。丸印が平面2次元解析の港内平均波高、三角印は3次元解析の港内中心点の波高、四角印はスロープ-露出型の実験結果である。各々の結果に僅かながら差はあるが、実験と平面解析には同様の傾向が見られる。実験では通水路以外からの波の遮蔽が完全ではなかったと思われるが数パーセントの差であり、実用的な精度は得られている。

図-15には港内の波高分布を示した。水深が29cm、

周期1.2秒、入射波高7cmの結果である。通水路の開口部付近はやや波高が大きい、港内はほぼ様な波高分布となっている。

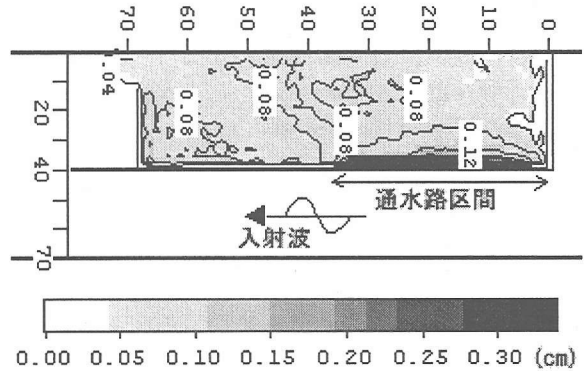


図-15 平面解析による波高分布

5. 結論

本研究では、波動を利用した海水交換型防波堤として、通水路型防波堤の水交換機能について、2次元水路を用いた水理模型実験と数値解析によって検証した。実験では、通水路からの流入量は波の入射角が25度以下の場合、Forchheimerの横越流量式の流量係数 $C_w=0.4$ として評価できることを示した。

スロープ型と水平型を比較すると、流入量に大きな差はなかったが、港内の静穏度はスロープ型が明らかに優れており、静穏性が最も求められる防波堤としてはスロープ型が適している。

VOF法を用いた3次元の解析でも、実験に近い流入量が得られたが、解析精度にやや課題を残した。

平面2次元の波変形解析では線流量のモデル化に横越流量の係数を応用することで、一定の評価が可能であることを確認した。

通水路型防波堤によって波動による海水交換が十分期待でき、数値解析によって海水交換量も一定評価できることを確認した。現地では潮位変動などを考慮して通水路の位置を決定する必要がある。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 土木学会, 水理公式集, pp. 294, 1985