

海水交換型防波堤に関する研究

森田修二*

1. まえがき

閉鎖性水域となる港湾は富栄養化や廃水等による水質悪化から沿岸域の水質汚濁を引起す一方、港湾の利用者にとっても問題となっている。本研究では、港湾の閉鎖性を改善することで水質の悪化を防ぎ、沿岸域への影響も緩和できると考えている。近年、港湾の水質改善対策として海水交換型の防波堤に関する研究が進められている。図-1に海水交換型の防波堤を用いて港内の水質悪化を改善する例を示した。海水の交換機能を有する透過性の防波堤には、例えば浮体式や潜堤が考えられるが、波の遮蔽と海水の交換機能は相反する課題であり、これらの構造物によって波を十分に遮断するためには課題がある。一方、港湾における汚濁の負荷量を考えれば、海水循環を促す適度な流れによって港内の水質維持は十分期待できる。

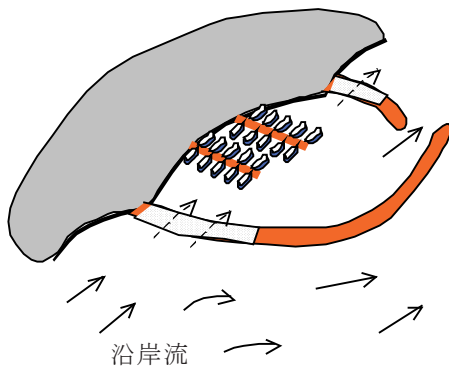


図-1 海水交換型防波堤による水質改善例

本研究では、防波堤にスロープ型やステップ型といった通水路を設けた通水路型防波堤の波に対する特性や海水の交換機能について研究を行なった。これらの防波堤は波の遮蔽性に優れており、海浜流や潮流といった沿岸流を利用して港外の水を港内へ取込むことができる。現地への適用を考えた場合、波の透過率や

実際にどの程度の海水交換量が得られるか把握しておく必要がある。本研究では、水理模型実験や数値解析によってこれらの特性を検証した。

2. 通水路型防波堤の概要

従来の防波堤に通水路を設けることで、海水交換機能を付加したのものには、様々な形体の防波堤があるが、通水路の基本形状から分類すると、多くは水平型のものである。防波堤に水平型の通水路を設けた場合、防波堤の基本的な機能すなわち波の遮蔽機能を確保するために通水路の水深を大きくする、通水路内に波のエネルギー逸散を図るなどの工夫がなされている。図-2には本研究で提案するスロープ型とステップ型の通水路を有する防波堤のモデルを示した。

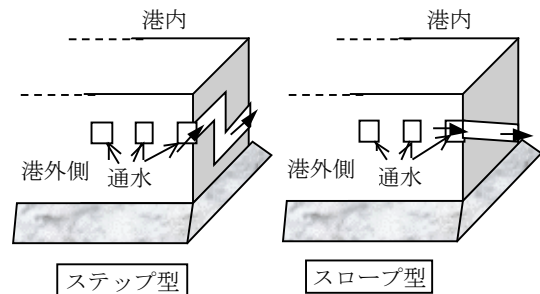


図-2 通水路型防波堤の概観

これらの防波堤のメリットとしては、①取水口（外洋側）が水面付近にあり、通水路の水深を大きくすることで生じる海水循環の阻害や漂砂による埋没がない、②注水口（港内側）が海底付近にあり、波の遮蔽効果が向上する、③流れ場の非対称性によって海水交換を促進する、等が考えられる。

本研究では、これらの防波堤の特性について、実験および解析によって検証を行なった。

*技術本部技術開発部

3. 通水路型防波堤の特性

3.1 波の透過率

図-3には、通水路が水平型とステップ型、スロープ型の防波堤のモデルを示したが、これらの防波堤について波の透過率を実験と解析によって検証した。

図-4には実験水槽の概要を示したが、この水槽では波の透過率の他に、波力や通水性に関する実験も行っており、その概要も示している。

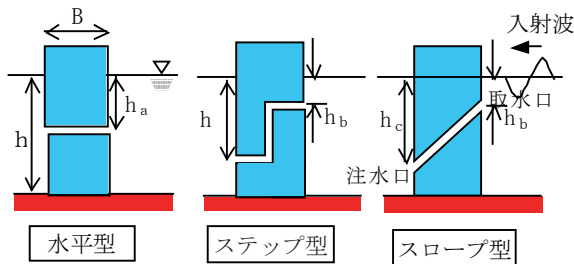


図-3 通水路型防波堤のモデル

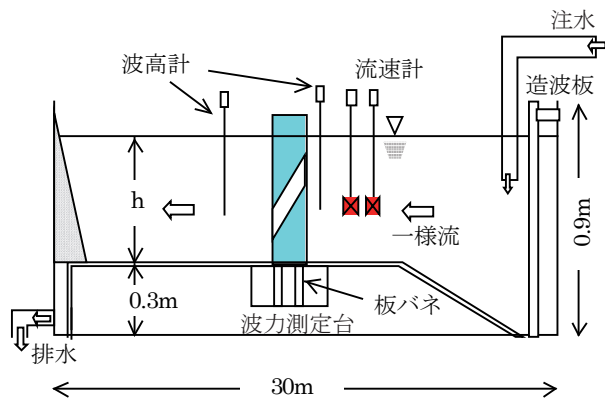


図-4 実験水槽の概要

図-5には波の透過率に関する実験結果と解析結果を示した。横軸は波数kと水深hの積、縦軸は透過率である。水深は20cmで水平型とスロープ型について通水路の開口高さが1cmと3cmの結果を示している。取水口の下端水深はスロープ型が10cm、水平型は13cmである。スロープ型の取水口の水深が小さいにも関わらず、水平型よりも透過率が小さくなっており、スロープ型が波の遮蔽効果に有利であることがわかる。解析結果は実線で示しているが、2次元の湧き出し分布法(境界積分方程式法)による結果であり、概ね良好な結果が得られている。

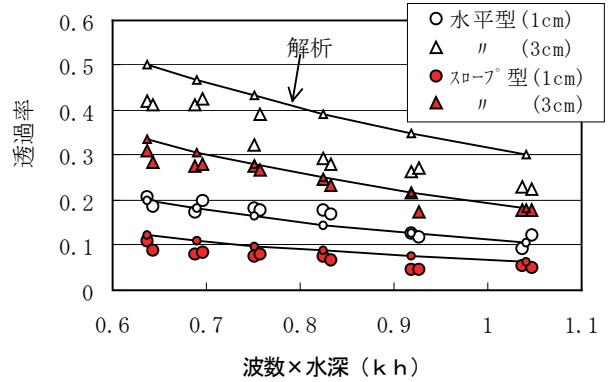


図-5 波の透過率

3.2 波力

本報では従来の2次元の湧き出し分布法に重み係数を導入して奥行き方向の形状変化を平均的に評価する解析手法¹⁾を考案した。一定水深における物体周りの定常の2次元微小振幅波について、入射波の速度ポテンシャル Φ_I は(1)式、回折波の速度ポテンシャル Φ_D は(2)式で表される。²⁾

$$\Phi_I = R_e \left[-\frac{igH_1}{2\omega} \frac{\cosh\{k(h+z)\}}{\cosh(kh)} e^{i(kx-\omega t)} \right] \quad (1)$$

$$\Phi_D = R_e \left[\int_S f(p, q) G(x, z; p, q) dS(p, q) e^{-i\omega t} \right] \quad (2)$$

ここで、 H_1 は入射波の波高、 h は水深、 ω は角周波数、 k は波数、 g は重力加速度、 f は湧き出し関数、 G はJohnのグリーン関数、 $\int_S dS(p, q)$ は物体表面の積分を表す。(2)式に水面や底面、無限遠方の境界条件を用いることで(3)式が求められる。ここで、 ϕ_I は入射波の複素振幅、 $\mathbf{n} = \{n_x, n_z\}$ は物体表面における単位法線ベクトルである。

$$\frac{\partial \phi_I}{\partial \mathbf{n}} = - \int_S f(p, q) \left(\frac{\partial G}{\partial x} n_x - \frac{\partial G}{\partial z} n_z \right) dS(p, q) \quad (3)$$

(3)式から求まる湧き出し分布関数 f を(2)式に代入することで回折波の速度ポテンシャル Φ_D が得られ、任意点の速度ポテンシャルや波高が算出できる。本手法で用いる重み係数は要素の線分長に乘じる係数であり、(4)式、(5)式には重み係数 W_j を導入したグリーン関数とその微分形の数値積分式の定式化を示した。図-6には通水路を有する防波堤に重み係数を適用する場合の概要を示した。図-7にはステップ型とスロープ型の防波堤が受ける波力の結果を示した。水深は40cm、波力を測定した防波堤の幅 D は30cm、通水路の幅は20cm、開口高さは8cm、取水口および注水口

の中心水深は10cmと30cmである。実験と解析ともに周期が短いほど波力が小さくなるが、この傾向は周期が短いほど水深増加による波動の減衰が大きくなるためである。また、解析ではスロープ型の波力が大きくなっており、実験結果でもその傾向はうかがえる。解析は透過率と同様に通水路幅を考慮した重み付き2次元湧き出し分布法を用いているが、実験と解析の比較から、本手法の適用性が検証できた。

$$\int_{\Delta S_j} G dS = \left(G_0 + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \right)_j \Delta S_j \cdot W_j \quad (4)$$

$$\int_{\Delta S_j} \left(\frac{\partial G}{\partial x} n_x - \frac{\partial G}{\partial z} n_z \right) dS = \left\{ \left(\frac{\partial G_0}{\partial x} n_x - \frac{\partial G_0}{\partial z} n_z \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\partial G_n}{\partial x} n_x - \frac{\partial G_n}{\partial z} n_z \right) \right\} \Delta S_j \cdot W_j \quad (5)$$

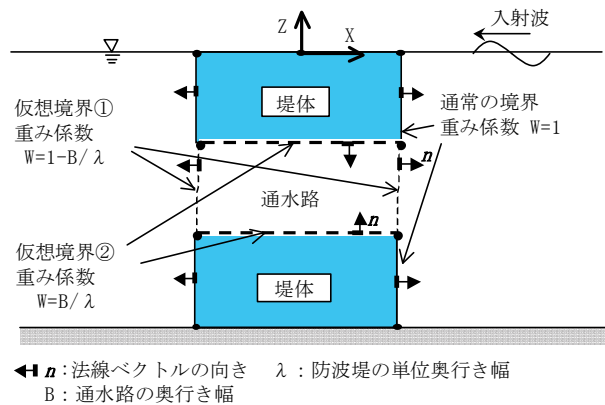


図-6 物体境界における重み係数の概念

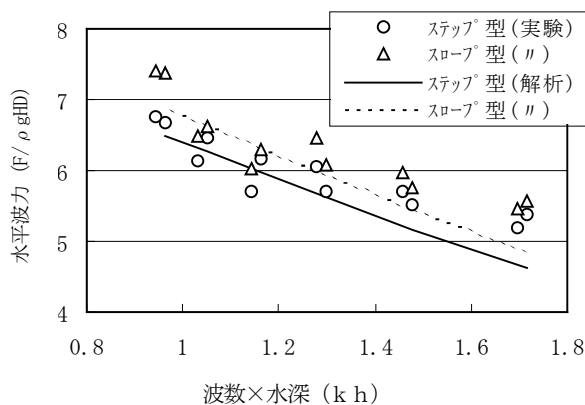


図-7 防波堤の受ける波力

3.3 波動に伴う流量フラックス

図-8には通水路から流入する流量フラックスを示

した。縦軸のフラックスは10秒～25秒間の時間平均した値で、 u_0 は水面水粒子速度の振幅である。実験条件は図-7と同じで水平型の1～3は通水路の中心水深が10cm、20cm、30cmである。スロープ型の流量は周期が長いほど流量が大きくなる傾向がある。この結果は波動によっても通水路を通じて海水交換がなされることを表しており、非常に興味深い結果である。

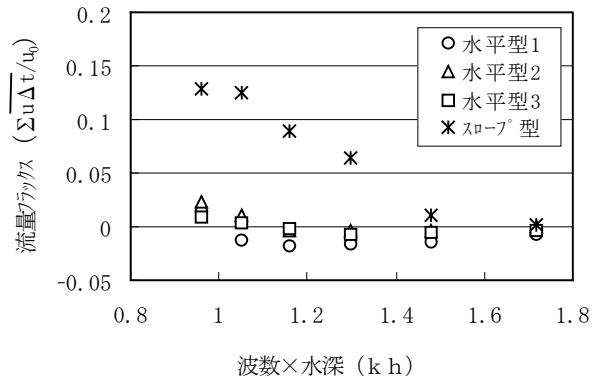


図-8 通水路からの流量フラックス

3.4 通水性

通水路型防波堤の通水性を検証するために、図-4の2次元水槽に一定流量の注水を行い水槽内に一様定常流を発生させた。水深はほぼ15cm、流速は1cm/s～10cm/sで一定、模型前後の水位変化と上流側の流速を測定した。本研究では非線形ダルシー則を用いて通水路型の通水性の評価し運動方程式を次式に示す³⁾。

$$-\frac{1}{\rho} \nabla(p + \rho g z) = \frac{\nu}{k_p} q + \frac{C_f}{\sqrt{k_p}} q^2 \quad (6)$$

$$\frac{1}{k_{pe}} = -\frac{g \xi}{\nu q} \quad (7)$$

$$\frac{1}{k_{pe}} = \frac{1}{k_p} + \frac{C_f q}{\nu \sqrt{k_p}} \quad (8)$$

ここで、 p は圧力、 ρ は流体の密度、 z は鉛直座標、 ν は流体の動粘性係数、 g は重力加速度、 q は流速、 k_p は長さの2乗の次元を持つ透水係数、 C_f は乱流抵抗係数である。

(6)式の左辺は動水勾配 ξ で表すことができ、見かけの透水係数 k_{pe} を(7)式で表すと、(6)式から(8)式が導かれる。(7)式を用いて見かけの透水係数と実流速の関係について整理し、線形近似により透水係数と乱流抵抗係数を求めることができる。

図-9にスロープ型の実験結果について、水位勾配と実流速の関係を示した。表-1の係数を用いて近似曲線を挿入している。図中の h_a は通水路の開口高さである。実験結果は近似曲線によってよく表されており、以上の手法で求めた非線形のダルシー則によって通水路の通水特性が評価できると考えられる。^{4), 5)}

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

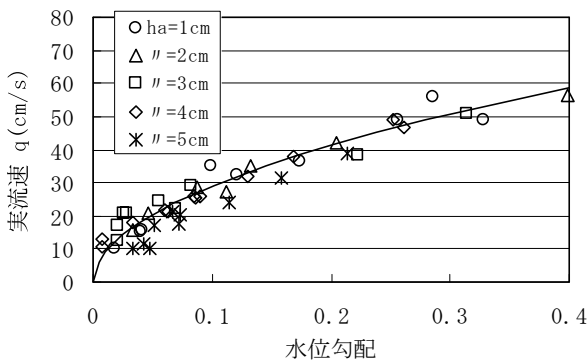


図-9 水位勾配と流速(20-7°型)

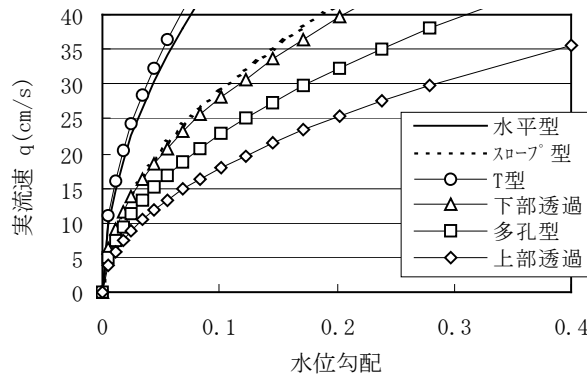


図-10 水位勾配と流速(構造別比較)

防波堤に水路を設けて海水交換を図る様々な研究が行われている。西守ら⁶⁾は数種の形状の防波堤模型を用いて本研究と同様に通水特性に関する実験を行っている。模型の寸法は本研究の模型よりも大きく、形状も複雑であるが、参考までに比較を行った。図-10に水位勾配と実流速の関係を示した。西守らは水没断面での平均流速と水位差の関係を近似曲線で評価して

いるが、ここでは港内側と港外側で開口率の平均値を用いて便宜的に実流速を算出した。マーク付きの細線が西守らの結果、実線および点線が本研究の結果である。最も通水性の良好なのはT型であり本研究の水平型とほぼ同程度と言える。スロープ型はやや通水性が劣るが、その他のタイプと比較すれば遜色ない。

4. 通水路型防波堤による海水交換

4.1 波と流れ場における検討

現地の港湾内外の流況を想定して、ここで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。

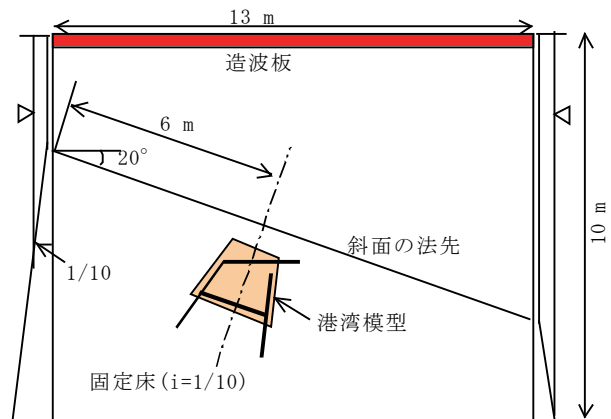


図-11 平面水槽の概要

図-11に示すように平面水槽内(13m×10m)に港湾模型(2m×1.5m)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。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。水深は沖側で33cm、港湾内の水深は一律に15cmにした。港湾の両側面には通水路型防波堤を配置した。固定床上に発生する沿岸流によって港内に外水を導入し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。

図-12には、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×u)と港内水量Vから、V/Qで表される時間である。

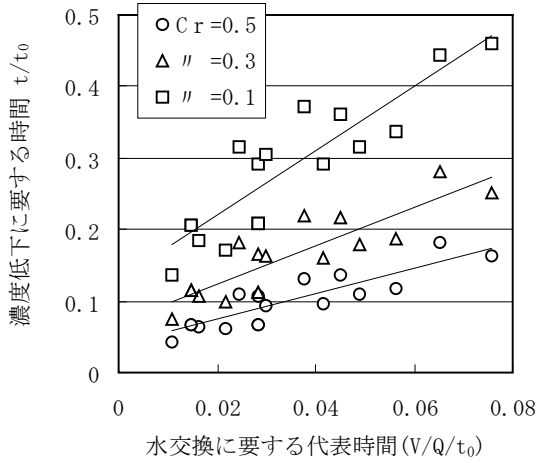


図-12 代表時間の相関 (水平型)

すなわち、通水路からの流入流量によって港内水量を置換するのに必要な時間を表している。なお、代表流速には Longuet-Higgins の砕波点の沿岸流速⁷⁾を用いた。図中の印は3測点の平均濃度比 $C_r (=C/C_0)$ 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。図-12 は水平型の結果であるが、実験で得られた範囲では良い相関が見られ、このような評価手法で港内の水を交換するのに必要な時間が推定できることがわかった。⁸⁾

4.2 波動による海水交換機能の検討

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-13 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水深や波高、波の入射角などに依存し、通水路内では衝撃的な波の伝播も予想される。ここでは水理模型実験によって通水路からの流入流量と港内の静穏度を検証する。

図-14 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、港内に投入した懸濁物質の濃度の低下速度から水交換量を評価した。港口からの波の回折を抑えるために、水路を中心で仕切った。

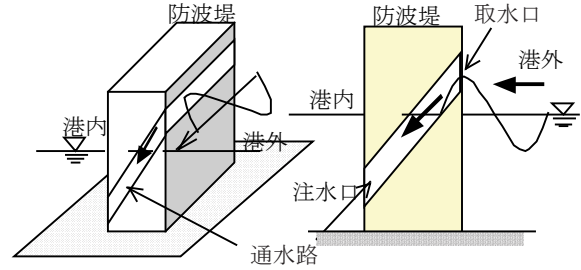


図-13 波動を利用した海水の導入

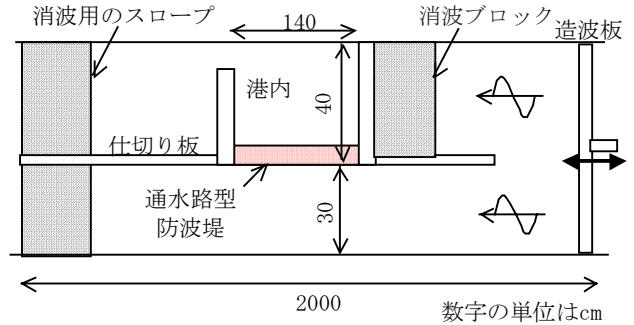


図-14 実験水路の概要 (平面図)

図-16 は露出型の防波堤について水交換機能の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 の式を応用する。

$$Q_w = C_w L_w \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right)^{3/2} \quad (9)$$

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(9)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直接は適用できない。

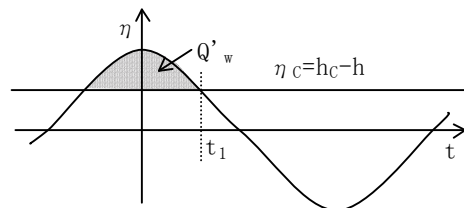


図-15 通水路からの越流量

図-15 のような時間波形を考えた場合、1周期間の越流量 Q_w は図の斜線部となり、式(10)で表される。

ここで、 h_c は通水路の下端高さ、 H は波高である。

$$Q'_w = \frac{1}{2\omega} \{H \sin \omega t_1 - 2(h_c - h)\omega t_1\} \quad (10)$$

式(9)の越流水深の項を平均水深 h_w で表し、 h_w を式(11)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。波高は通水路型防波堤の前面に設置した波高計の平均値を用いた。

$$h_w = Q'_w / 2t_1 \quad (11)$$

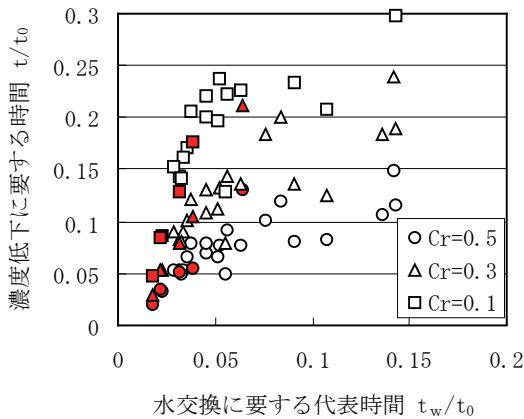


図-16 代表時間の相関(露出型)

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。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。

各濃度比における相関関係が認められ、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。濃度低下時間は代表時間のほぼ5倍であり、この結果から横越流量の式(9)の流量係数を見直せば $C_w=0.4$ となる⁹⁾。

5. あとがき

本研究では通水路型防波堤の基本特性を明らかにし、本研究で考案したスロープ型やステップ型の通水路型防波堤が波の遮蔽性、通水性で優れていることを確認した。次に、港湾模型を用いて波と流れ場における港湾の水交換機能に関する実験を行い、周辺の代表流速と通水路の開口率などから求まる水交換に要する代表

時間で評価できることを確認した。また、流れのない状況を想定して波動による水交換機能についても実験的に検証し、水交換機能が簡易な算定式による水交換に要する代表時間で評価できることを確認した。これらの結果は紙面の都合で紹介できなかったが、数値解析によっても良好な結果を得ている^{4),8),9)}。

以上の結果から、通水路型防波堤を用いることで港湾の水質改善は十分に可能であること、その設計に際しては代表時間を用いた概略設計や数値解析を用いて現地に促した検討ができることがわかった。

【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) 中村孝幸ほか、「わき出し分布法を用いた2次元物体まわりの波変形と流体力の解析法」、第29回海岸工学講演会論文集、pp. 462~466、1982。
- 3) 出口一郎、「透過性構造物による波の変形」、水工学シリーズ94-B-7、1994。
- 4) Morita, S. and Deguchi, I (2001), "Study of the Capacity of Breakwater with Channel to Exchange Water", ISOPE, 2000, Vol. 3, pp. 545-552
- 5) 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。
- 6) 西守男雄ほか、「海水交換型防波堤の透過量評価手法の提案」、港湾技術研究所報告、第38巻、第2号、pp. 63~97
- 7) Longuet-Higgins, M. S. "Long shore current Generated by obliquely incident sea wave", Jour. Geophys. Res, Vol. 75, No. 33, pp. 6776-6789, 1970.
- 8) 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。
- 9) 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。