

通水路型防波堤の通水特性に関する研究

STUDY ON FLOW RATE THROUGH THE BREAKWATER WITH CHANNEL

森田修二¹・出口一郎²
Syuuji MORITA and Ichirou DEGUCHI

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)

Deterioration of water quality becomes severe problems in some harbors because the circulation of water in the enclosed region by breakwaters is weakened and exchange of water becomes inactive there. Submerged breakwaters and floating breakwaters have an advantage over the impermeable breakwaters in that they can more easily exchange water. However, they are not effective to maintain harbor tranquility. We have already shown that breakwaters with slope-type channel and step-type channel effectively reduce transmitted wave height when compared with a straight-type channel.

In this study, the flow rate through the breakwater with channel is examined by experiments and numerical model to investigate the effect of channel in tidal current. It is found that the flow rate can be estimated from the non-linear Darcy's law where the difference between the water surface levels in and outside of the harbor plays an important role.

Key Words : Breakwater with channel, slope-type channel, straight-type channel, flow rate, non-linear Darcy's law

1. まえがき

港湾では防波堤や離岸堤によって静穏域が確保されているが、海水の循環が妨げられ水質悪化が問題となることがある。海水の交換機能を有する透過性の防波堤には、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。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。これまで、著者ら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について研究^{1) 2)}を行っており、波の遮蔽性に優れていることなどを示した。一方、図-1は通水路型防波堤を通じて生じる海水の流れを示したものであるが、海浜流や潮流といった流れの場において、実際にどの程度の流量が得られるか把握しておく必要がある。本研究では、通水路型防波堤の基本的な海水交換機能を検討するために、一様な定常流の流れ場における通水特性の定量的な評価を目的としている。

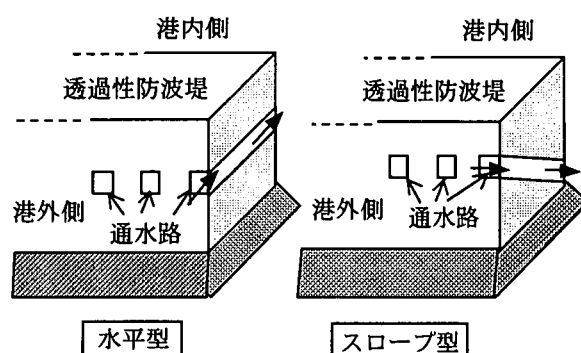


図-1 水平型とスロープ型の通水路型防波堤

2. 実験の概要

(1) 実験の目的

通水路型防波堤を現地の港湾に適用した場合、海浜流や潮流による主な流れは防波堤の外周に沿った流れとなり、通水路を通して港内へ流入する流量は不明である。通水路の開口径やその配置設計を行うためには、通水路からの流入量を考慮した解析が必要であるが、通水路の実形状をモデル化した3次元

の流況解析を行うことは現実的でない。本研究では、通水路を通した流量が防波堤内外(港内と港外)の水位差によって評価できるか検証を行った。この仮定が成立すれば、通水路の実形状をモデル化することなく、港湾周辺の流況を鉛直方向に積分した平面的な解析が可能となる。

(2) 実験装置

実験では、スロープ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-2には、実験に用いた通水路型防波堤のスロープ型の模型を示した。2次元水槽の幅に合わせて模型を設置するもので、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。図-3には模型の断面図を示したが、スロープ型については、取水口が上流側にしたものを順スロープ型、注水口を上流側にしたものを逆スロープ型とする。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。スロープ型の場合は、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。実験模型のスケールは現地の1/50程度を想定した。

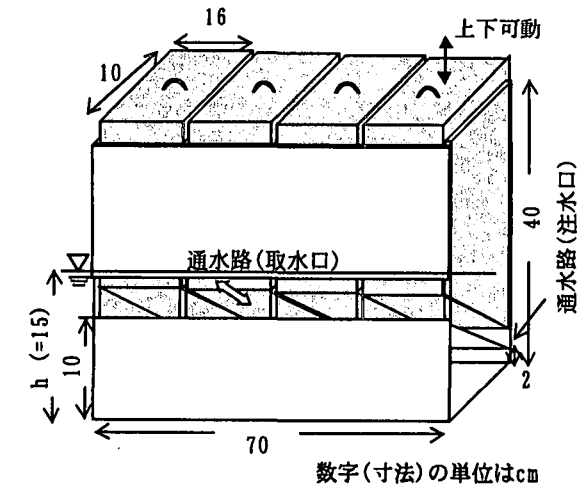


図-2 通水路付き防波堤の模型 (スロープ型)

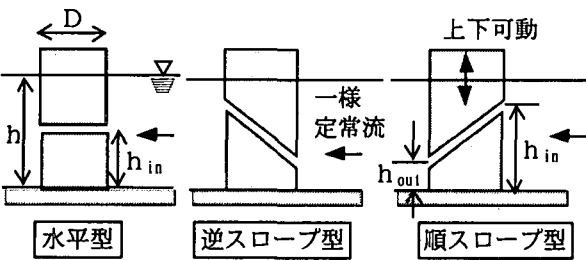


図-3 防波堤模型の断面

図-4には実験に用いた2次元水槽の概要を示した。水槽の中央付近に防波堤の模型を設置して、水槽の上流から一定流量の注水を行い、下流側から排水することで、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で一定になるように管理した。模型の前後における水位の変化と上流側の流速を測定した。水位は容量式波高計、流速は2成分の電磁流速計を用いて測定した。

また、同じ水槽を用いて造波実験も行い、波の透過率を測定した。水深は20cmとし、波の周期は1.0秒～1.5秒まで0.1秒間隔に6ケース、波高は3cm～5cmの2ケースで計12ケースの実験を行った。波高は容量式波高計を用いて測定した。

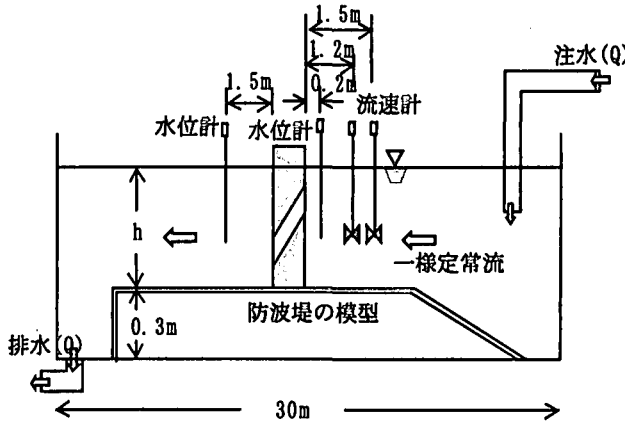


図-4 実験水槽の概要

3. 実験結果

(1) 通水特性

図-5～図-7には、流量と防波堤模型の前後における水位勾配の関係を示した。流量は図-4の防波堤模型前面に配置した2点の流速計の平均値と水深から算出した。流速については、鉛直方向や奥行き方向における流速分布を測定したが、ほぼ一様な流速が得られていることを確認した。図の印は、通水路の高さ h_a (1cm～5cm)ごとの流量と水位勾配の関係を表している。縦軸の流量は水槽の幅で除して単位幅あたりの流量を示している。横軸の水位勾配は自由水面の水位変化は無視できるものとして、模型の前後に配置した2点の水位計の水位差から求めた。図-5～図-7の結果を見ると、いずれのタイプの通水路においても流量の増大に伴って水位勾配が大きくなっている。この傾向は通水路の高さに関わらず共通しており、また、その高さに応じて流量が大きくなっている。通水路のタイプについて比較すると、水平型の通水性(水位勾配に対する流量の大きさ)はスロープ型に比べてやや優れており、通水路の形状から見て妥当な結果と考えられる。

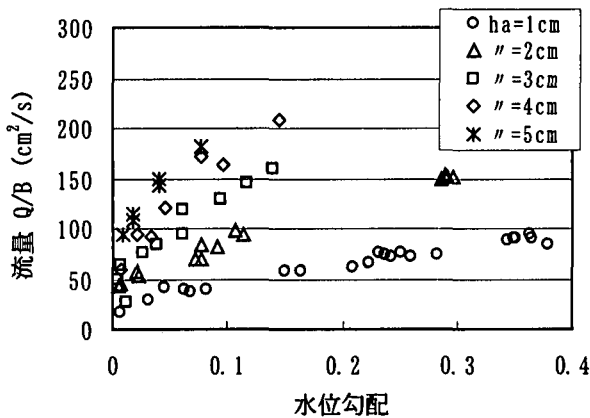


図-5 水位勾配と流量(水平型)

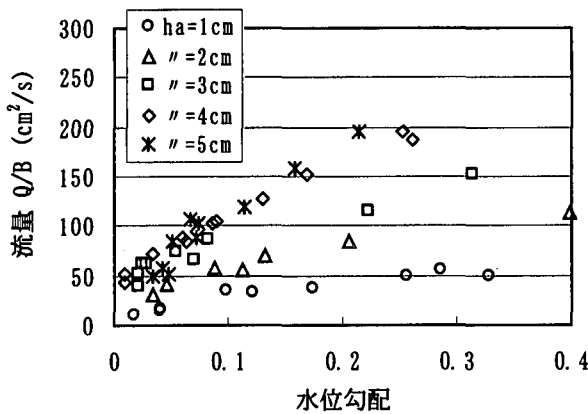


図-6 水位勾配と流量(順スロ-7°型)

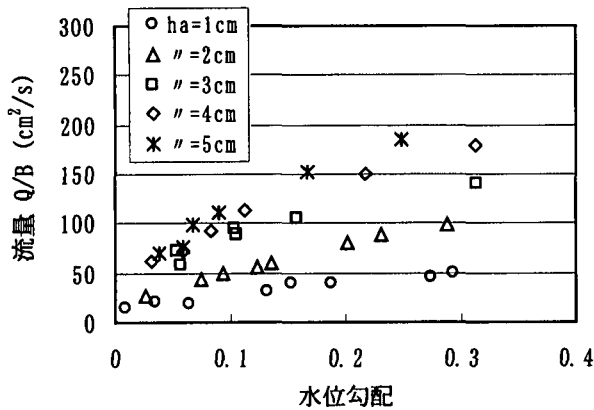


図-7 水位勾配と流量(逆スロ-7°型)

一方、順スロープと逆スロープの通水性はほぼ同じと見なせる。このように通水路のタイプには依存するが、図-5～図-7の結果から、通水路型防波堤の通水性は水位勾配によって評価できそうである。

ここで、本研究では非線形ダルシー則を用いて通水路型防波堤の通水性を評価することを試みた。ダルシー則は多孔体中の流体運動を評価したものであるが、線形のダルシー則を適用できないような空隙が大きく流速が大きい場合に、非線形のダルシー則が適用できる³⁾。多孔体中の流体運動に関する運動方程式を次式に示す。

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

ここで、 p は圧力、 ρ は流体の密度、 z は鉛直座標、 v 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。(1)式の左辺は動水勾配 h で表すことができ、見かけの透水係数 k_{pe} を(2)式で表すと、(1)式から(3)式が導かれる。

$$\frac{1}{k_{pe}} = -\frac{g h}{v q} \quad (2)$$

$$\frac{1}{k_{pe}} = \frac{1}{k_p} + \frac{C_f q}{v \sqrt{k_p}} \quad (3)$$

図-8～図-10は実験結果について、(2)式を用いて見かけの透水係数と実流速の関係を示したものである。実流速は流量を通水路の断面積で除して、通水路内の平均流速として表した。図からわかるように、通水路のタイプによっては異なるが、通水路の高さに関わらず、実流速と見かけの透水係数は(3)式で表される線形関係にあると考えられる。表-1は図中の線形近似式を用いて k_p 、 C_f を求めたものである。

表-1 透水係数と乱流抵抗係数

	水平型	順スロ-7°型	逆スロ-7°型
k_p	0.129	0.058	0.022
C_f	0.016	0.027	0.017

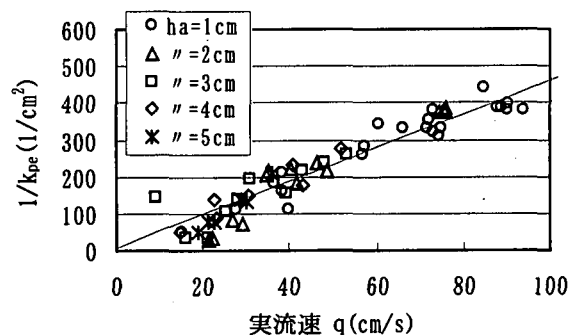


図-8 見かけの透水係数(水平型)

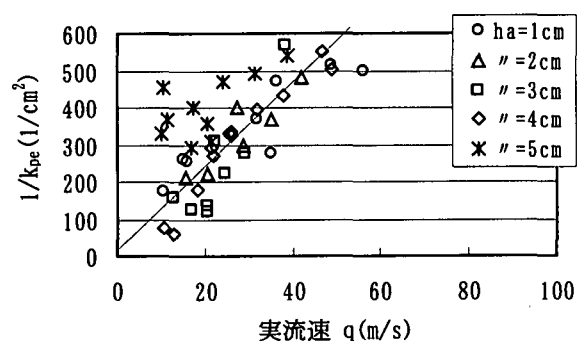


図-9 見かけの透水係数(順スロ-7°型)

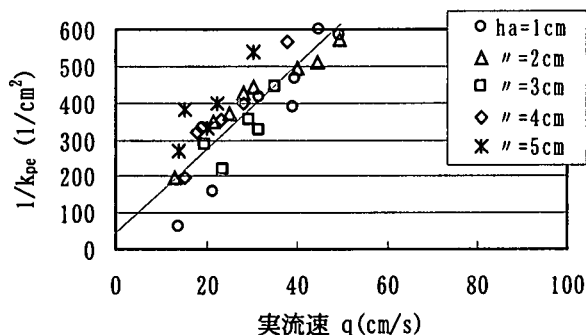


図-10 見かけの透水係数(逆スロ-プ型)

図-11～図-13は、図-5～図-7の水位勾配と流量の関係を水位勾配と実流速の係数に改め、表-1の係数を用いて近似曲線を挿入したものである。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関する係数によって通水路の通水特性が評価できると考えられる。

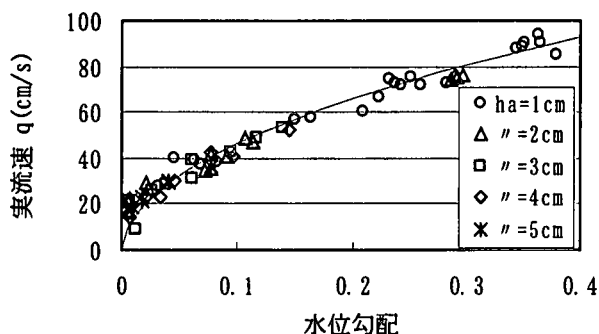


図-11 水位勾配と流速(水平型)

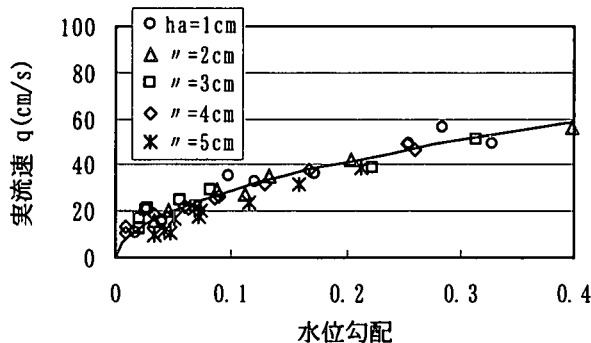


図-12 水位勾配と流速(順スロ-プ型)

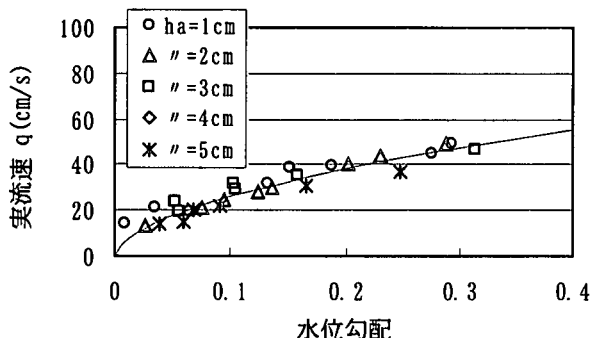


図-13 水位勾配と流速(逆スロ-プ型)

(2) 異型水路との比較

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。その1例として西守ら⁴⁾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(高さ60cm, 幅100cm, 奥行き45cm, 水深50cm)本研究の模型よりも大きく、模型の形状はT型, 多孔型, 上部透過型, 下部透過型の4タイプのリットケ-リンとなっている。港内側と港外側で開口率が異なるなど形状が複雑であるが、参考までに比較を行った。図-14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-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型であるが、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と考えられる。

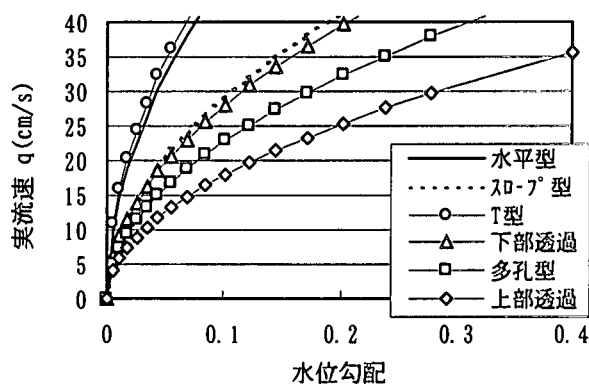


図-14 水位勾配と流速(構造別)

(3) 波の透過率

防波堤に海水交換機能を付加するためには、波の透過率も把握しておく必要がある。図-15には、通水路の高さを1cmと3cmにした場合の水平型と順スロープ型の透過率を示した。横軸は波数kと水深hの

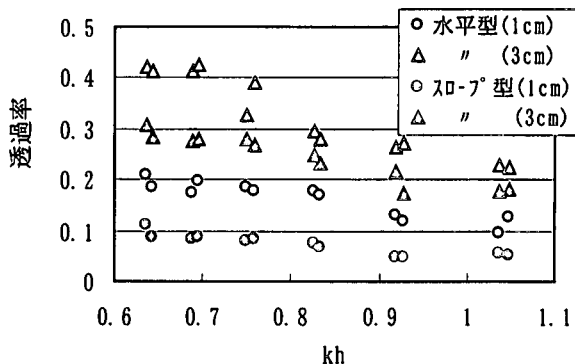


図-15 波の透過率

積，縦軸は透過率である。水深が20cmであり，スロープ型は取水口の中心水深が9.5cmと8.5cmに対し，水平型は12.5cmと11.5cmである。スロープ型の取水口の水深が小さいに関わらず，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。

4. 解析的検討

(1) 解析手法

実験結果から通水路型防波堤の通水特性が明らかになったが，現地における流況を予測するために本研究では次式の実流方程式にADI法を適用する。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial u h}{\partial x} + \frac{\partial v h}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \tau_y \right) \\ + g \frac{\partial \xi}{\partial y} - L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

ここで， ξ 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種々の式が提案されているが，本報では渦動粘性係数にJames⁵⁾の式を用い，底部せん断力は椀木⁶⁾の式およびChezyの公式を用いる。

実流方程式に線形のダルシー則の領域を混在させるHybrid型の解析手法⁷⁾はすでに提案しているが，非線形のダルシー則については多少工夫が必要である。(2)式，(3)式から水位勾配 ξ と実流速 q の関係は次式で表される。

$$\xi = m q^2 + n q \quad (7)$$

$$m = -C_f / g \sqrt{k_p} \quad (8)$$

$$n = -v / g k_p \quad (9)$$

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。ここで，図-16に示すように，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，任意点における近似式は(10)式で表される。(10)式は任意の水位勾配における(7)式の接線勾配を傾きとし，任意点を通る1次式である。この手法では，誤差が累積する可能性があるため，計算ステップには十分留意する必要がある。

$$q = k_a \xi + k_b \quad (10)$$

$$k_a = 1 / \sqrt{n^2 + 4m\xi_i} \quad (11)$$

$$k_b = \left(-n + \sqrt{n^2 + 4m\xi_i} \right) / (2m - \xi_i) \quad (12)$$

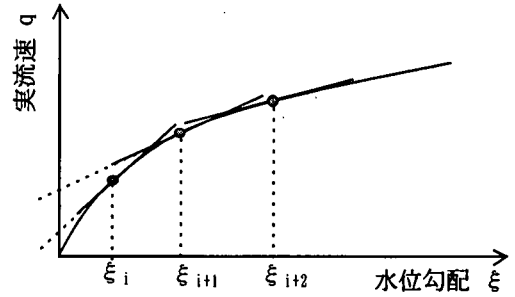


図-16 非線形ダルシー則のモデル化

非線形ダルシー則の領域に(10)式の関係を用い，ADI法における定式化を行うと以下の通りである。

$$\xi_{ij}^{n+1/2} = -A_{ij} u_{ij}^{n+1/2} + D_{ij} \quad (13)$$

$$u_{i-1j}^{n+1/2} = -E_{i-1j} \xi_{ij}^{n+1/2} + F_{i-1j} \quad (14)$$

$$v_{ij}^{n+1/2} = -k_a' (\xi_{ij+1}^{n+1/2} - \xi_{ij}^{n+1/2}) + k_b' \quad (15)$$

ここで，添え字の i ， j は直交座標系の差分点， k_a' ， k_b' は断面平均流速に換算した非線形ダルシー則の係数である。通常のADI法の通り，(13)式，(14)式を用いてステップ n の ξ_{ij} ， v_{ij} から解析領域のステップ $n+1/2$ の ξ_{ij} ， u_{ij} を求め，(15)式を用いてステップ $n+1/2$ の v_{ij} を求める。次に(13)式～(15)式の u と v を入れ替え，差分方向も i と j を入れ替えた式を用いて，ステップ $n+1/2$ からステップの ξ_{ij} ， u_{ij} ， v_{ij} を求める。種々の係数は次式で表される。ここで， h_a は通水路の高さ， h_{ij} は水深である。

$$A_{ij} = \Delta t \cdot h_a / 2\Delta s \quad (16)$$

$$B_{ij} = \xi_{ij}^n - A_{ij} v_{ij}^n + A_{ij-1} v_{ij-1}^n \quad (17)$$

$$D_{ij} = A_{i-1j} u_{i-1j}^n + B_{ij}^n \quad (18)$$

$$E_{ij} = k_a' / (1 + k_a' A_{ij}) \quad (19)$$

$$F_{ij} = (k_a' D_{ij} + k_b') / (1 + k_a' A_{ij}) \quad (20)$$

$$k_a' = k_a \cdot h_a / h_{ij} \quad (21)$$

$$k_b' = k_b \cdot h_a / h_{ij} \quad (22)$$

以上の操作を繰り返し行うことで流れ場の非定常解析が行える。また，一般領域とダルシー則の領域との接続点では ξ_{ij} と u_{ij} あるいは ξ_{ij} と v_{ij} を連続させればよいので容易に処理できる。

(2) 解析結果

図-17～図-19には，通水実験の結果に対して

multi-linearの近似式を適用した解析結果を示した。図の実線は実験結果の近似曲線であり、白抜き印は通水路の高さが1cm, 2cm, 4cmの3種類についての解析結果である。また、水平型の図にはダルシー則を用いずに、通水路の高さを単に水深変化として評価した結果を塗りつぶし印で表した。水深変化として扱った結果では、通水路内の抵抗の評価に問題があり、通水路の高さが小さいほど実験結果との差が大きくなるなど、この解析手法では通水路内の流量を適切に評価できないことがわかった。

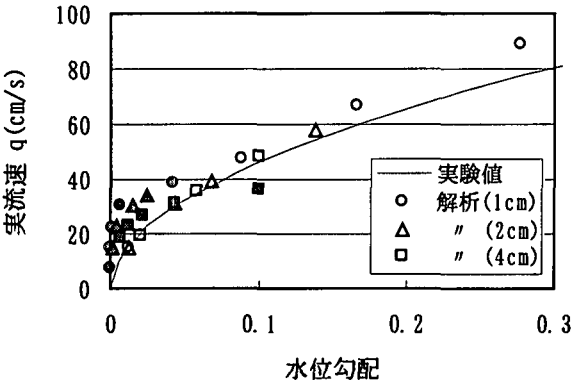


図-17 multi-linearモデルによる解析結果（水平型）

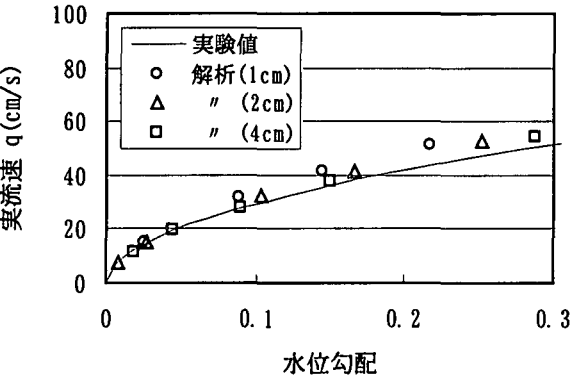


図-18 multi-linearモデルによる解析結果（順スロープ型）

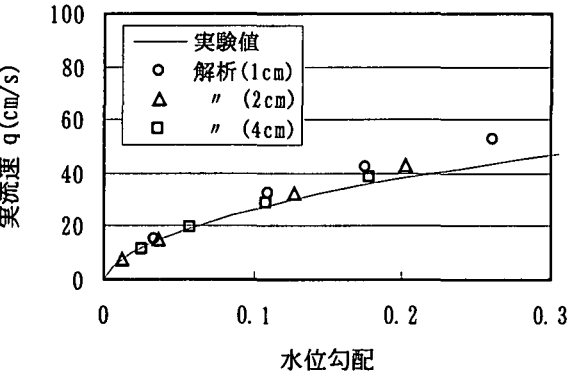


図-19 multi-linearモデルによる解析結果（逆スロープ型）

multi-linearの近似式を適用した結果では、通水路のタイプによらず概ね良好な結果が得られている。ただし、水位勾配が大きい範囲では実験値とやや差違が見られる。解析手法のモデル化の影響で水位勾配が大きいほど誤差が累積すると考えられるが、現地に適用した場合の水位勾配を考慮すると、この程度の解析精度があれば問題はないと考えられる。

5. 結論

本報では、海水交換機能を有する通水路型防波堤について、海浜流や潮流といった流れの場でどの程度の流量が期待できるの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が、いずれのタイプにおいても防波堤前後の水位差と流量の関係に非線形のダルシー則が適用できることが確認できた。海浜流方程式にADI法を適用した数値解析によって実験結果は精度良く再現できており、現地の流況解析を行う場合には通水路の3次元形状を忠実に取り扱わずともダルシー則領域としてモデル化することで平面的な解析が可能と考えられる。また、水平型とスロープ型を比較すると、水平型の方が通水性は良いことがわかったが、通水路の形状から考えて妥当な結果と思われる。一方、波の遮蔽性はスロープ型が優れており、現地への適用を考える場合には、流量と波の透過率の両面から検討する必要がある。本研究で通水路型防波堤の基本特性が把握できたので、今後は港湾内における平面配置を考慮した海水交換性能に関する研究を行っていく予定である。

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) 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) 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
- 5) James, I.D.: A nonlinear theory of longshore currents, Estuarine and Coastal Marine Science, Vol. 2, pp. 235~249
- 6) 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
- 7) 森田修二ほか: 汚濁物質の拡散抑制技術に関する平面2次元解析, 海洋開発論文集, 第14巻, pp. 441~446, 1998