

# スロープ水路を有する透過性防波堤に関する研究

森田修二\*・出口一郎\*\*

## 1. まえがき

沿岸域の利用を図るためには、外洋からの来襲波を防ぐために防波堤や離岸堤が設けられる。一方、これらの構造物によって囲われた水域は閉鎖的な水域となるため、静穏域は確保されるが、波を遮断するとともに海水の循環をも妨げることになり、水質の悪化が問題となることがある。近年、閉鎖性水域の水質改善を目的として、海水の交換機能を有する透過性の防波堤に関する研究が行われている（例えば、森口朗彦ら, 1992; 小田一紀ら, 1995）。しかし、防波堤に欠かせない波の遮蔽機能と付加価値として求められる海水の交換機能は相反する課題であり、現地への適用はなかなか進んでいないのが現状である。透過性に優れたものには、例えば、浮体式や潜堤が考えられるが、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、港湾などの水質悪化の原因には、船舶からの漏出油や人的なゴミ投棄などが考えられるが、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。著者ら（1999）は、既に従来の防波堤に特徴のある通路すなわちステップ型やスロープ型の通路を設けることで、海水の循環を妨げず効果的に波を遮断できることを示した。本研究では、スロープ型の通路を設けることで、波の遮蔽性に加え、波動によっても海水の循環が促進されることを示した。また、通路を有する防波堤の透過率を算定する適当な解析手法が見当たらないことから、従来の湧き出し分布法に工夫を加えた解析手法を提案する。

## 2. スロープ型通路の概要

従来の防波堤に通路を設けることで、海水交換機能を付加したものには、様々な形体の防波堤があるが、通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、通路の水深を大きくしたり、通路内に波のエネル

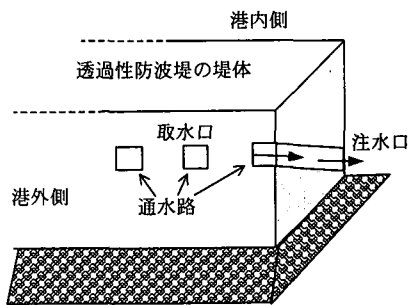


図-1 スロープ型通路を有する防波堤

ギー逸散を図るなどの工夫がなされている。しかし、このような工夫は同時に透過性防波堤の目的である海水の循環性をも阻害したり、漂砂による通路の埋没が予想される。一方、著者らの提案したステップ型やスロープ型の通路を設けた防波堤は波の遮蔽効果が優れており、波の遮蔽効果をあげることで、海水の循環性を阻害することもない。図-1には本研究で提案するスロープ型通路を有する防波堤のモデルを示した。

スロープ型通路の特長としては以下の①～③のことが挙げられる。

- ①取水口（外洋側）が水面付近にあり、通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。

著者ら（1999）は既に①と②については解析的あるいは実験的に実証済である。本報では、③の特徴を実験的に検証した。一般に、微小振幅波を仮定してラディエーション応力による流れを除いて考えると、波動による海水の移動は生じない。図-2において水平型の通路の場合、防波堤の中心断面に関して通路と周辺の流れ場が対称となり、基本的には波動による海水交換は期待できない。一方、スロープ型通路付き防波堤は、注水口と取水口で境界の影響が異なるなど流れ場の非対称性により海水交換が促進されることが期待できる。

また、波の透過を許すような防波堤を現地に適用する

\* 正会員 工博 (株)奥村組 電算センター  
\*\* 正会員 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科

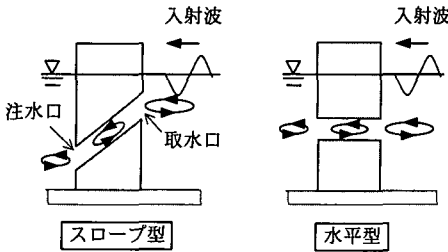


図-2 通水路と周辺の水粒子軌道

ためには、波の透過率を正確に評価する必要があることから、従来の湧き出し分布法に工夫を加えて、一定の間隔で設けられた通水路を考慮できる解析手法を提案する。解析手法の妥当性は実験的に検証する。

3. 解析手法

(1) 解析手法の概要

図-1に示したような通水路が一定間隔で設けられた防波堤の透過率を算定しようとするれば、厳密には3次元解析が必要となるが、防波堤のような長軸の構造物の3次元解析を行なうことは極めて難しい。中村ら(1990)は湧き出し分布法を用いて、規則配列された3次元任意形状の物体周りにおける波変形の解析手法を示している。構造物の対称性を用いて解析領域は縮小できるが、進行波と共に斜波成分に関する積分が発生し、煩雑な数値計算が必要となっている。

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、一定間隔で設けられた通水路などの奥行き方向について形状の変化を平均的に評価する簡易的な解析手法を採用した。図-3に示すような座標系で、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  $\phi_I$  は(1)式、湧き出し分布法を用いると、回折波の速度ポテンシャル  $\phi_D$  は

$$\phi_I = R e \left[ -\frac{igH_I}{2\omega} \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} e^{i(kx-\omega t)} \right] \dots \dots (1)$$

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

(2)式で表される。ここで、 $H_I$ は入射波の波高、 $h$ は水

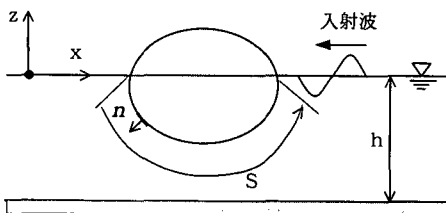


図-3 物体周りの座標系

深、 $\omega$ 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。湧き出し分布関数  $f$  は(2)式に水面や底面、無限遠方の境界条件を用いることなどで導かれる(3)式によって求められる。ここで、 $\phi_I$ は入射波の複素振幅、 $n = \{n_x, n_z\}$ は物体表面における単位法線ベクトルである。

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

(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  $\phi_D$  が得られるので、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とは、要素の線分長に乗じる係数であり、全ての境界で重み係数を1とすれば通常の湧き出し分布法となる。(4)式、(5)式は重み係数  $W_j$  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ものである。

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

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

この重み係数は要素ごとに0~1の値を設定し、湧き出し強さに奥行き方向の変化を考慮する。図-4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。奥行き方向への物体境界としての平均占有率を重み係数とするものである。奥行き  $\lambda$  あたりの通水路の幅を  $B$  とすると、通水路内の境界の重み係数は  $W = B/\lambda$ 、通水路によって欠損する堤体部分は  $W = 1 - B/\lambda$  となる。

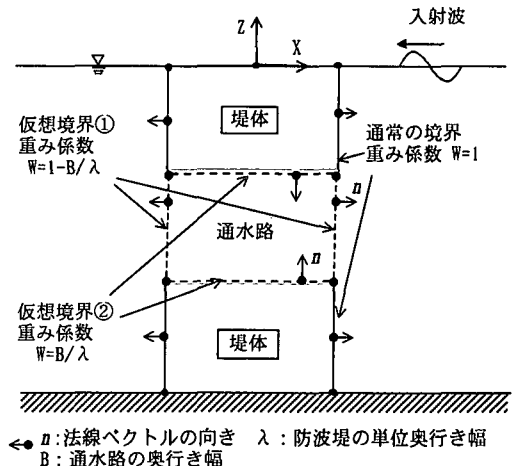


図-4 物体境界における重み係数の概念

(2) 適用性の検討

ここで、本手法の適用性について解析的に検討するために、中村ら(1990)が行なった3次元解析の結果と比較した。図-5は2次元水路に透過堤をおいた平面配置を示したものであるが、柱列型と矩形型の透過堤について解析を行なった。水深は35cmである。本手法では、柱列型の重み係数は空隙率から設定し、 $W=1-\epsilon$ とした。図-6に解析結果を示したが、透過率の大きい方が柱列型の結果である。ここで、 $\lambda$ は水路幅であり、規則配列された各堤体間のスパン長に該当する。中村らは $\lambda/L > 1$ では斜波成分が卓越するようになるとして波向成分ごとに積分する算定式を用いている。本手法と比較すると、 $\lambda/L$ が0.8程度以下ではいずれの型についてもよく一致している。本手法は基本的には2次元解析であり、斜波成分が卓越する場合には課題があるが、本研究で想定している通水路付きの防波堤では、海水交換の観点から通水路の設置間隔は大きくならないので、この程度の範囲で適用性があれば十分と考えられる。

4. 実験の概要

実験では、スロープ型通水路の防波堤に加え、比較のために水平型通水路の防波堤の模型を用いて実験を行う。図-7には実験に用いた通水路付き防波堤の模型を示した。スロープ型通水路の取水口(港外側)の水深と

注水口(港内側)の水深差を20cmとし、水平型は通水路の水深の影響とスロープ型との比較を行うために、スロープ型の取水口および注水口の水深と同一のものと、その中間の3つの通水路を設け、口を開閉することで通水路の水深が変更できるようにした。なお、模型のスケールは現地の1/10~1/20を想定した。

図-8には実験に用いた2次元水槽を示した。水槽の中央に防波堤の模型を設置し、模型の背後に3成分超音波流速計と容量式波高計を配置した。流速計は模型の中心線上で注水口から5cm離れた位置に置き、注水口から吐き出される際の流速の波形を測定した。波高計は模型の透過側に一定離れた位置に2箇所設置して透過波の波高を測定した。入射波の波高は、あらかじめ模型が無い状態で測定した。

実験の水理条件は、水深は40cmで一定とし、周期を1.0~1.5秒までの6ケース毎に波高が3~5cmの異なる2ケースの計12ケースの実験を行った。

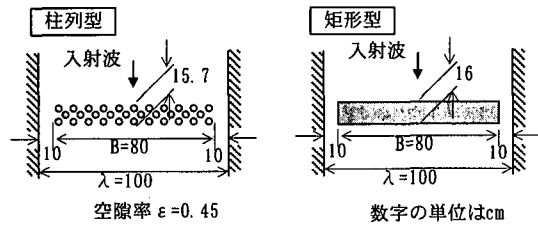


図-5 透過堤の解析モデル

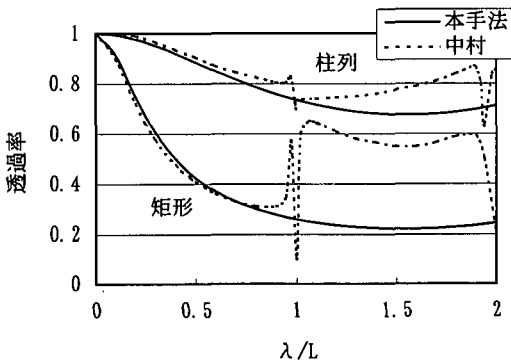


図-6 透過率の比較

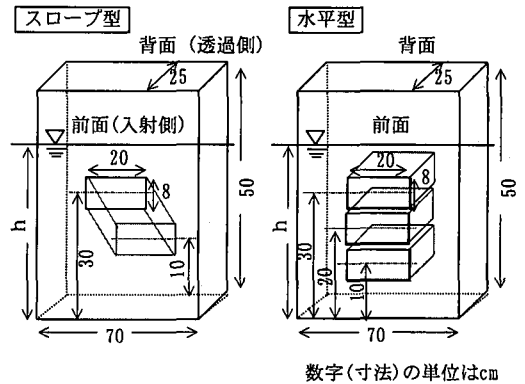


図-7 防波堤の模型

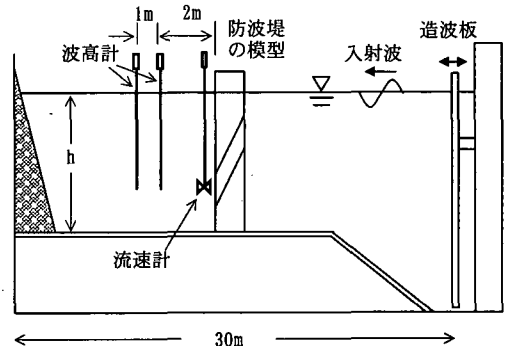


図-8 実験に用いた水槽

5. 実験結果

(1) 流速

図-9には流速の波形の一例を示した。注水口から5 cm離れた位置で  $kh=1.05$  における流速の波形である。縦軸は水面水粒子速度の振幅で無次元化した流速を表している。水平型の流速はほぼ正弦波形を示しているのに対し、スロープ型はやや波形に乱れがあり、正方向(透過方向)にドリフトしている。この差違は通水路の形状によるものであり、スロープ型の通水路が波動方向に対して非対称であることに起因していると考えられる。

図-10には流速の振幅  $u^*$  を示した。図-9と同様に水面水粒子速度の振幅で無次元化した流速を表している。水平型では水平型1の流速が最も大きく、通水路の水深が小さいほど流速が大きくなっており、波動における水深と速度ポテンシャルの関係が確認される結果となっている。一方、スロープ型の流速は水平型1よりも大きくなっている。この原因は明確でないが、著者ら(1999)は通水路内の注水口付近における速度ポテンシャルは注水口の水深だけでなく、取水口の水深にも影響されることを湧き出し分布法により解析的に示した。水平型1よりもさらに大きくなるのは通水路の形状によるものと考えらるべきであろう。この流速の差は、海水の交換性ではスロープ型の通水路が有利であることを示している。

図-11には通水路の注水口の流速を積分することで求められる累積流入量の経時変化を  $kh$  ごとに示した。透過側への流量を正として表している。縦軸の流量は単位断面あたり流量フラックスの積分値を水表面流速の振幅で除した値であり、横軸は造波時間である。時間とともに流量が累積される傾向はあるが、スロープ型以外は概ね測定誤差の範囲と考えられるのに対し、スロープ型の流量は明らかに増加する現象が見られる。図-9の流速の波形に見られたように、スロープ型の波形だけが正方向にドリフトしていることが明確に表された結果である。また、図-12には通水路から流入する流量フラックスの周期による変化を示した。縦軸のフラックス

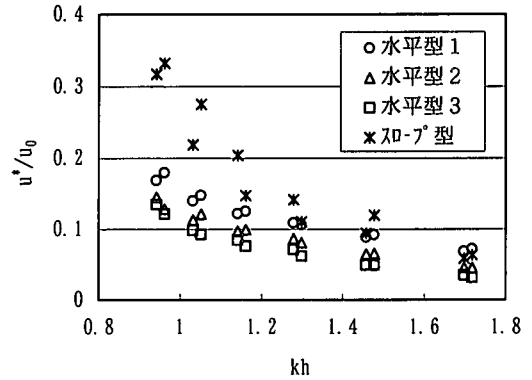


図-10 流速の振幅

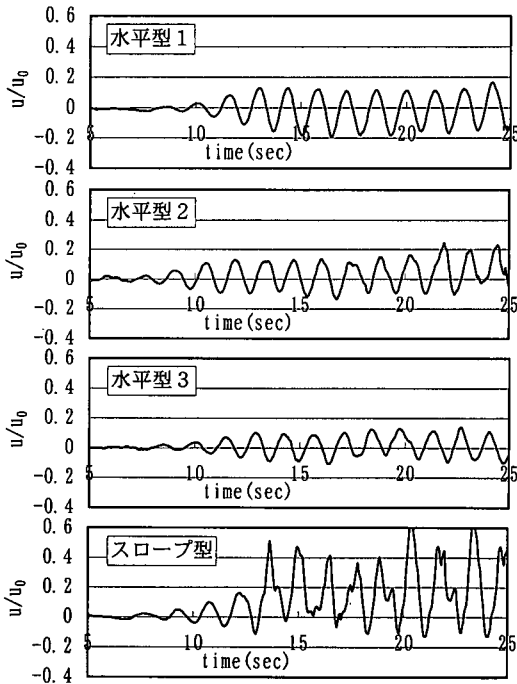


図-9 注水口付近の流速の波形 ( $kh=1.05$ )

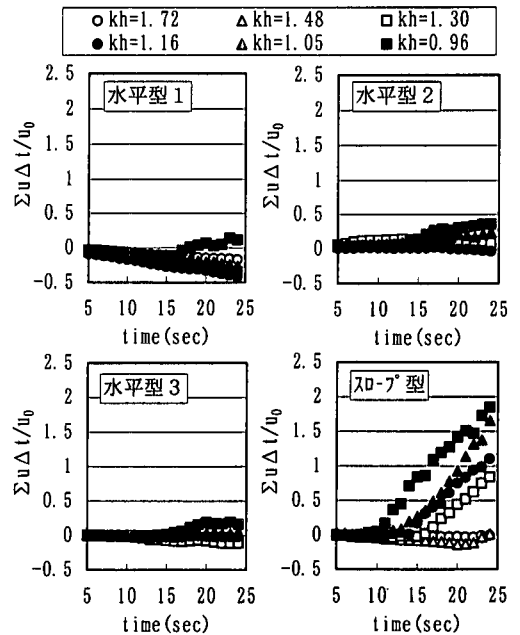


図-11 通水路からの累積流入量

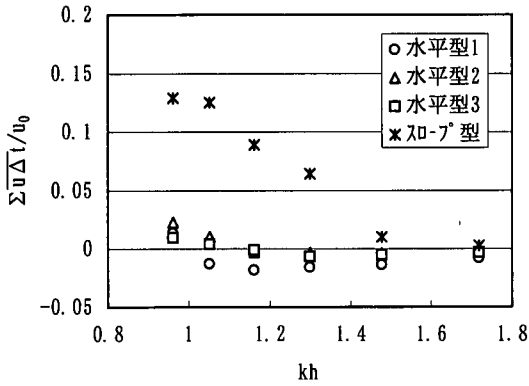


図-12 通水路からの流量フラックスの変化

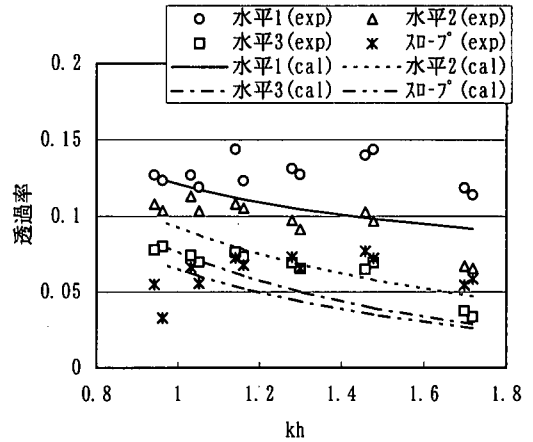


図-13 透過率の変化

は、10 秒～25 秒間の時間平均した値である。スロープ型の流量は周期が比較的短い領域では他の通水路と同様に測定誤差の範囲にあるが、比較的長い領域では周期が長いほど流量が大きくなる傾向がある。このフラックスの結果は、波動におい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。

以上の結果から、流速と流量フラックスの両方でスロープ型の通水路は水平型に比べて大きく、海水の交換性において有利であることがわかる。この原因は明確ではないが、全て通水路の形状に起因するものと考えられる。

## (2) 透 過 率

図-13 に透過率の結果を示した。○や△、□印が実験結果、実線や点線、一点鎖線が解析結果を表している。解析結果は先に提案した重み係数を導入した湧き出し分布法による結果である。水平型の結果を見ると、通水路の水深が大きいかほど透過率が小さくなっているが、この傾向は解析でも評価できており、数値的にもよく表されている。また、スロープ型の透過率は水平型3の結果と同等であり、水平型1の透過率の半分程度になっている。これらの傾向や数値的な差違も解析によってよく表されていることがわかる。水平型に比べてスロープ型の通水路が波の遮蔽効果が優れていることは、既に実験および通常の湧き出し分布法による解析で示したが、重み係数を導入した解析によってもスロープ型の有利性が確認できた。実験と解析で数値的にやや差違の見られる部分もあるが、通常の湧き出し分布法では数値的な評価ができないことを考慮すれば、重み係数の導入は有効な手法であると考えられる。

## 6. 結 論

本研究では、従来の防波堤にスロープ型の通水路を設けることで、波動によっても海水交換が促進されること

を実験的に検討した。また、通水路を有する防波堤の透過率を算定する適当な解析手法が見当たらないことから、従来の湧き出し分布法に重み係数を導入する解析手法を提案した。海水の交換性については、実験結果から水平型との比較によって、注水口付近の流速はスロープ型の方が大きく、注水口からの時間平均された流量フラックスについても、水平型はほぼ0であるのに対し、スロープ型は透過側へのフラックスが発生し、波動によっても海水交換がなされることが確認できた。この原因は明確ではないが、通水路の形状が防波堤模型の中心断面に関して非対称であることに起因していると推測される。

また、解析手法については、中村らの解析結果との比較から  $\lambda/L$  が 0.8 程度以下では適用可能であることが確認された。透過率の実験と解析結果の比較から、数値的にはやや差違が見られる部分もあるが、通水路の形状による相対関係は評価できており、実用的な解析精度は確保されている。擬似的な3次元解析手法であることを考慮すれば近似的な解析手法として容認できるものと考えられる。

## 参 考 文 献

- 小田一紀・真栄平宜之・中西昭人・田中彬夫 (1995): 波浪によるパイプ式透過堤の海水導入特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1116-1120.
- 中村孝幸・小野正順 (1990): 波向き特性を考慮した堤体列まわりの平面的な波変形の評価法について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 534-538.
- 森口朗彦・藤原正幸・山本正昭・田中輝男 (1992): 潜堤付孔空き防波堤の実海域での導水特性と泊地内水環境予測, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 886-890.
- 森田修二・出口一郎 (1999): 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.