

潜堤付防波堤による海水交流工法の開発 (II)

間 辺 本文*・ 中 泉 昌 光**・ 山 本 正 昭***

1. はじめに

漁港泊地内の海水は、陸揚げされた魚や荷捌場フロアの洗浄に用いられる。また近年港内を活魚の一時蓄養場や養殖場としても利用することが多くなったため、より一層の港内水の清浄化が要求されてきている。港内水の清浄化のためには、廃水処理施設を整備することはもちろんであるが、積極的に外海水を港内へ取り込む必要がある。

著者らは、前報 1) で、海水導入工法の一つとして波による平均水位の上昇を利用した潜堤付防波堤を提案し、水路における断面実験により、既にその基本的機能について明らかにしている。その結果、潜堤の構造をブロック張捨石式にすると、小波高時にも遊水部の水位上昇を引き起こし確実に一方向流が発生すること、その水位上昇量は海底勾配・入射波周期・遊水部長さとの相関性は小さく、ほぼ換算沖波波高により決まること、換算沖波波高・潜堤付防波堤の形状条件・開口部の流量係数を与えることにより導水量の算定が可能であること、港内への波高伝達率は開口部が管水路タイプの場合には、 $0.1 H_0$ 以下でほとんど問題にならないこと等がわかった。

今回は、効率的な導入が可能な潜堤の平面形状、潮位や波の入射角が変化した場合の導水量の変化、導入水の拡がり形状及び平面流速分布の特徴、海水交換に有効な開口部配置等について実験的に検討した。

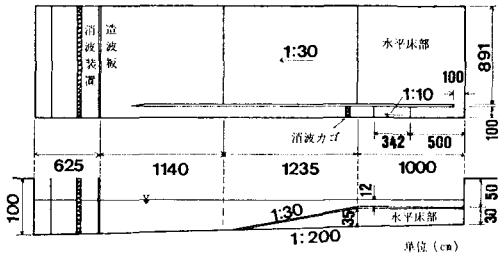
2. 実験施設及び方法

表一1 に実験諸元を示す。

潮位変動による導水量の変化に関する実験は、水路(長さ100m、幅1m、深さ1.5m)内に勾配1/30の斜面と水平床を設け、この水平床前端に潜堤の前法端を合わせ想定縮尺1/30の模型を設置して行い、遊水部の平均水位上昇量・開口部の平均流速等を求めた。潜堤の構造は、ブロック張捨石式で、防波堤は越波を許さない天端高と

表一1 実験諸元

	水路実験	平面実験
想定縮尺	1/30	1/50
堤体設置水深 h (cm)	20.0	12.0
水位 (cm)	-3.3~+3.3	0.0
海底勾配 i	1/30	1/30
周期 T (s)	1.46 2.20	1.13 1.70
換算沖波波高 H_0 (cm)	3.6~10.7 4.1~10.7	3.0~6.0 1.7~6.3
潜堤の構造	ブロック張捨石式	コンクリート製
〃 天端高 (cm)	0.0	0.0
〃 天端幅 (cm)	30.0	20.0
〃 法勾配	1:2	1:2
〃 法線方向長さ B (cm)	100	29~188
被覆ブロック重量 (g)	640	—
開口部タイプ(横(cm)×縦(cm))	管水路(10×5, 10×10)	管水路(b ×10)
〃 断面積 A (cm ²)	100	30, 60, 120
開口幅 b (cm) (2 b_0)	10	3, 6, 12
遊水部長さ (cm)	40, 90	24, 36



図一1 実験施設

した。潮位は、潜堤の天端高を基準として ± 3.3 cm の範囲で変化させた。測定方法は文献 1) と同様である。

その他の実験は、図一1 に示した幅 10.11m、長さ 40.00m の規則波造波平面水槽に、勾配1/30の斜面と長さ 10.00m の水平床を設け、水平床先端部に図一2 に示すような想定縮尺1/50の潜堤付防波堤の模型を設置して行った。潜堤はコンクリート製で、防波堤は越波を許さない天端高とした。防波堤に作用する波圧を調べた結果その安全性が確認された²⁾ ため、遊水部長さは経済的に有利な潜堤の法先が防波堤に接する長さである 24 cm を主とした。潜堤の平面形状としては3種を考え、最も効

* 正会員 工修 水産庁水産工学研究所漁港水理研究室
** 正会員 水産庁振興部開発課
*** 正会員 農博 水産庁水産工学研究所漁港水理研究室長

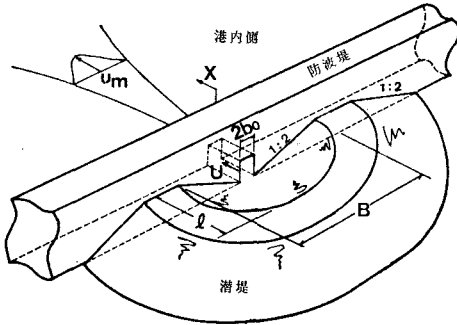


図-2 潜堤付防波堤の概略図

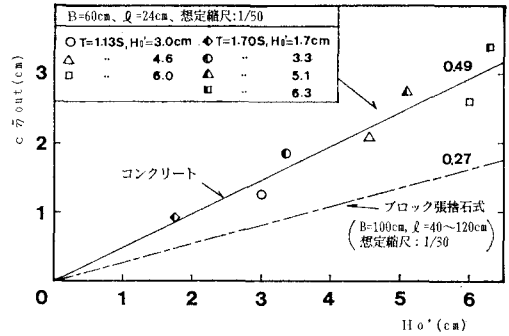


図-4 潜堤構造と遊水部の平均水位上昇量

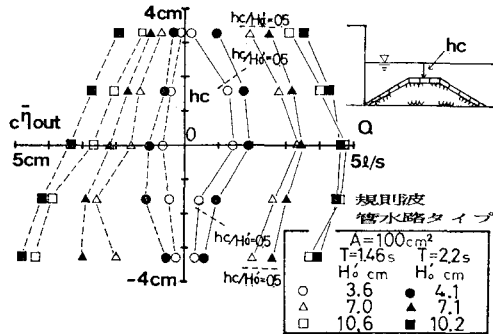


図-3 遊水部の水位上昇量と導水量

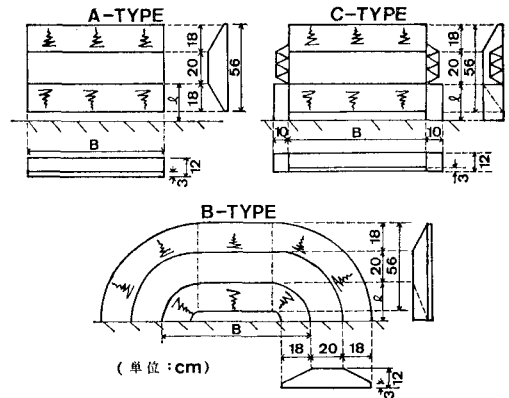


図-5 潜堤の平面形状

率よく導水できるタイプを選定し、それに対して波の入射角の影響を調べた。検討した入射角 α は 0° , 30° , 60° の3種である。波の入射角を変えるにあたっては、造波機はそのままの位置で、堤体模型を波の入射方向に対して α の角度だけ傾けることで対応した。遊水部の水位は、あらかじめ防波堤直角方向に数本の容量式波高計を設置して各波高に対して測定し、防波堤へのはね上がりの影響がない前面6cmの地点を遊水部の水位の代表とすることにした。 $\alpha=30^\circ$, 60° の場合には開口部前面6cmの地点に設置された3本の波高計の平均から求めた。開口部流速は、水路実験で明らかのように断面内でほぼ一様なため、開口部中央に設置された1本のプロベラ流速計により測定した。また、導入水の拡がり形状は染料で、平面流速分布は電磁流速計及びフロートで調べた。海水交換に有効な開口部の配置は、 $6\text{m} \times 4\text{m}$ の矩形の泊地を持つ港をモデルに検討した。

3. 実験結果及び考察

3.1 潮位変動の影響

図-3に、潜堤上水深 hc に対する導水量 Q (平均流速 $U \times$ 断面積 A)及び導水能力の指標となる開口部を設けない場合の遊水部の平均水位上昇量 $c7_{out}$ の変化を示す。 $c7_{out}$ は潜堤の天端が水面上にわずかに出ているときに最大となる。一方、導水量は潜堤の天端が静水位に

一致したときに最大となり、潜堤上水深が $-0.5H_0 \sim 0.5H_0$ の範囲であれば、水位が変化しても導水量はそれほど減少しないことがわかる。従って、潮位差が1m程度であれば、平均潮位に潜堤の天端を一致させると、小波高時にも安定した海水導入が図れる。

3.2 潜堤の構造と平面形状

潜堤構造は水路実験では捨石式であったが、平面実験ではコンクリート製とした。平面水槽に導波板及びコンクリート製潜堤を設置して断面実験を行い、遊水部の水位上昇量 $c7_{out}$ と H_0 の関係を示したのが図-4である。図中、一点鎖線は水路における規則波実験の結果から得られた直線である。コンクリート製潜堤は不透透性が強く、捨石式潜堤に比べ2倍弱の平均水位の上昇を引き起こし、海水導入に有効なことがわかる。実際に、コンクリート製潜堤のような不透透構造物を施工するにあたっては、築造方法の検討が必要であるが、以下の実験ではすべて捨石式潜堤と同断面形状のコンクリート製潜堤を用いた。

効率的に外海水を導入するための潜堤の平面形状として、図-5に示したように、潜堤の端部を開放したもの(Aタイプ)、端部を円弧状にして防波堤へすりつけたもの(Bタイプ)、端部を直立壁で止めたもの(Cタイプ)

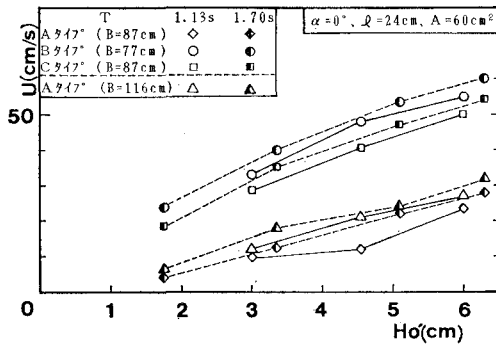


図-6 各タイプの開口部平均流速

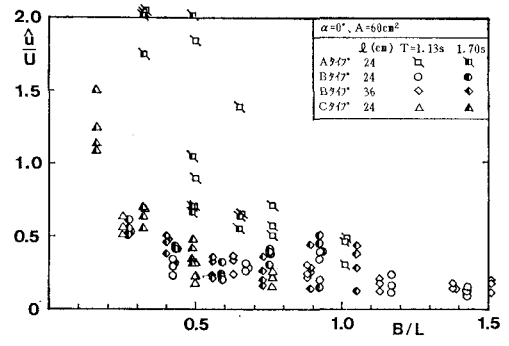


図-8 開口部の流速変動

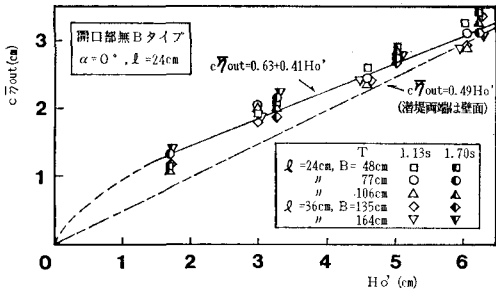


図-7 遊水部の平均水位上昇量 (Bタイプ)

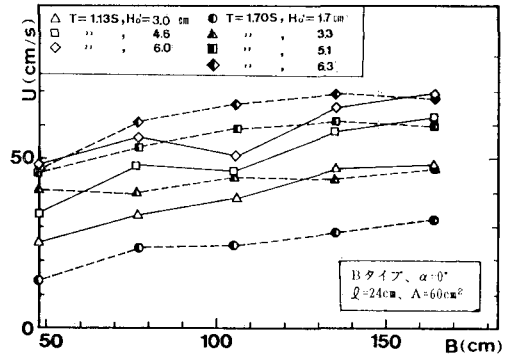


図-9 潜堤長さによる開口部流速の変化

の3つのタイプを考えた。最適なタイプを選ぶにあたって、波の入射角は 0° 、すなわち波が潜堤に直角に入射する場合で検討した。図-6は、潜堤長さBが同程度の場合の各タイプの開口部に発生する平均流速を示しているが、各波高ともBタイプが最大となっていることがわかる。Aタイプは、潜堤長さを長くとることにより、両端を閉じた効果と同程度の効果が期待できるかどうかを比較するために考えたものであるが、その効果は極めて小さいことがわかった。

図-7は、Bタイプの $c\eta_{out}$ を示している。両端を円弧状に閉じたことにより、小波高時に、より水位上昇が大きくなることがわかる。遊水部長さが36cmの場合でも結果は同様であった。Cタイプではこのような傾向は小さく、Aタイプでは逆にある程度の波高がないと、有意な平均水位の上昇は発生しなかった。

図-8は、開口部流速の変動 $\hat{u}$ と平均流速の比を示したものである。 $\hat{u}$ は流速データから長周期変動を取り除いた後、ゼロアップクロス法により求めた流速の振幅の有義値である。横軸は潜堤長さを入射波長で割った値をとっている。これによると、 B/L が小さくなると流速変動が大きくなることがわかる。Aタイプの変動はきわめて大きく、BタイプとCタイプは、Cタイプの $B/L < 0.2$ の場合を除けば同程度である。Bタイプでは、 $\hat{u}/U$ は最大で0.5程度である。

以上より、Bタイプは円弧状浅瀬による波の集れん効

果や、流速の変動が小さくそれによるロスが小さいと考えられることから、潜堤形状としては最も有利である。

図-9は、Bタイプの潜堤長さ B と開口部の平均流速の関係を示したものである。潜堤長さが長くなるにつれ、平均流速の増加が認められるが、その傾向は緩やかになる。また、波高が同程度の場合には、周期が長い方が流速は大きい。実験の範囲では、最低の潜堤長さ($B=48$ cm, 潜堤形状は円弧)でも海水導入に十分な流速が発生することがわかった。遊水部長さが36 cmの場合にも、以上のような傾向が見られた。

潜堤付防波堤は従来の海水導入工法に比べ、きわめて効率が高いが、それを導水効率 Q/Q_i により見てみる。ここで、 $Q=UAT$ 、 $Q_i=HLB/(2\pi)$ で、 T は波の周期、 H は入射波高である。導水効率は、潜堤長さが最も短い円弧のときに最大となり、波高が1.5 mのとき、 $A=60$ cm 2 では0.5程度を示す。図-10にBタイプの導水効率を整理した。導水効率は $A/(BH)$ とともに向上するが、0.25付近より横ばいとなっている。また、 $A/(BH)$ が0.15より大きくなると波形勾配の影響が現われ、波形勾配が大きいと導水効率も高くなる。また、水深波長比による差異はほとんど見られない。

次節以降、潜堤形状はすべてBタイプとした。

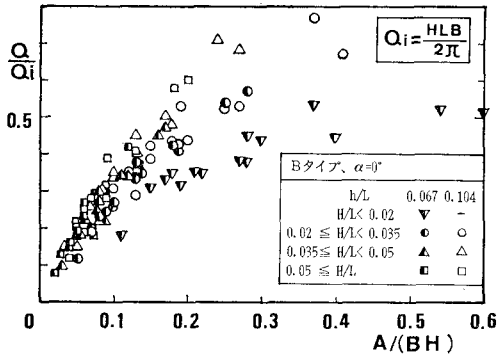


図-10 導水効率

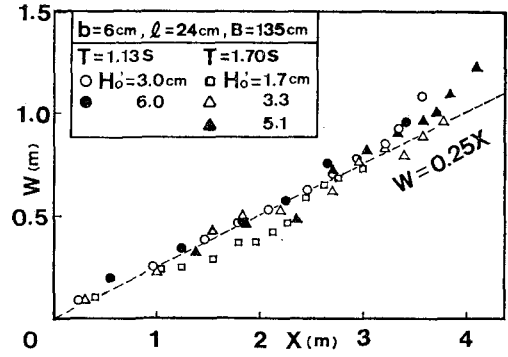


図-12 導入水の拡がり幅

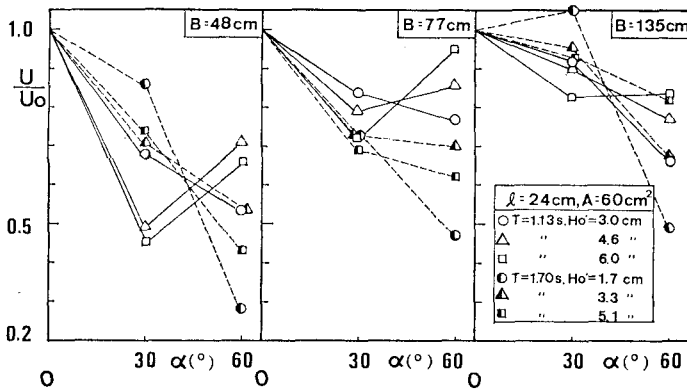


図-11 波の入射角による開口部平均流速の変化

3.3 波の入射角に対する導水量の変化

潜堤付防波堤に波が直角に入射する場合は、入射波と防波堤からの反射波が遊水部や潜堤上で衝突するため、遊水部の平均水位上昇量は大きく、また、波の遊水部への打ち込みが直接開口部に達するため開口部流速も大きくなる。しかし、実際は、激浪方向と海水交換の悪い夏場の波向は一致するとは限らない。従って、波が斜めから入射した場合に、どの程度導水機能が保持されるか検討しなければならない。

図-11は、各潜堤長さごとに、 $\alpha=30^\circ, 60^\circ$ の場合の開口部の平均流速 U と $\alpha=0^\circ$ の場合の平均流速 U_0 との比を示している。これによると、入射角の増加に伴い、概ね平均流速が減少している。 U/U_0 は概ね 0.4 以上で、 B が小さいと U/U_0 の入射角による減少は大きくなっている。従って、斜めから入射する波による導水を直角入射のときと同程度に期待する場合は、潜堤長さを長くする必要がある。データのばらつきは潜堤内の振動によるもので、潜堤長さが小さいほど大きい。今回、潜堤の構造がコンクリートであったことも一因と考えられる。

3.4 導入水の拡がり形状と流速分布

$\alpha=0^\circ$ で、泊地が十分に広い場合の導入水の港内への

拡がり形状を、導入水に着色することにより可視化した。導入水は、開口部から入射波の周期の振動成分をもつ噴流となって、先端部と外縁部で港内水を取込みつつ左右対称に港内に拡がる。図-12は、開口部から導入水先端までの距離 X とその時点の導入水の最大拡がり幅の半値 W の関係を示している。導入水は、入射波に関係なく、 $W=0.25X$ に従って拡がる。開口部が広い場合にも、その外縁はほぼ $W=0.25X$ の関係を満たしつつ拡がる。港内にフロートをあらかじめ投入し、染料とフロートの動きを比較する

と、染料外縁部では染料の拡がりにフロートが追従していることがわかった。従って、染料は導入水の拡がり状況を示しているとみなせる。

港内の開口部中心軸上の流れは入射波の周期で振動しているが、常に港内向きである。また、この振動の振幅は、 B タイプの場合、開口部で最大でも平均流速の 0.5 倍と小さく、それに起因したロスも小さいため、港内の流況も平均流速で代表することにする。流速は、開口部から港内側へ $X=25, 50, 100, 150, 200$ cm の各断面で 5 点ずつ、電磁流速計と超音波流速計を用いて測定した。測定時間は、導入水のフロントが通過して流れが定常になった後の約 30 秒間である。図-13は、乱れが十分発達していると考えられる $X=100, 150, 200$ cm の各断面の流れの中心付近の 3 点の平均流速 u とその断面の最大流速 u_m の比を縦軸に、最大流速発生点からの流軸直角方向距離 y と各断面の最大流速の半値半幅 $b_{1/2}$ の比を横軸にとっている。 u_m と $b_{1/2}$ は、各断面の流速分布を放物線で近似することにより求めた。実験値は、実線で示した二次元自由噴流の Goertler の解にほぼ一致しており、平均流速分布には相似性があることがわかる。

図-14は、流速分布の相似性を考える上での特性値となっている u_m と $b_{1/2}$ を二次元自由噴流と比較したもの

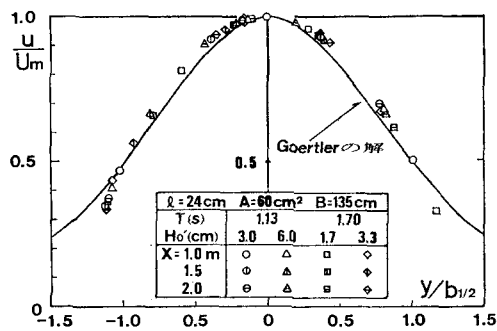


図-13 平均流速分布の相似性

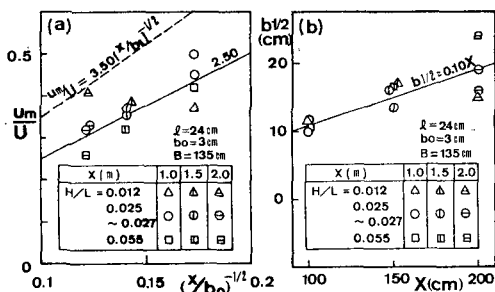


図-14 二次元自由噴流との比較

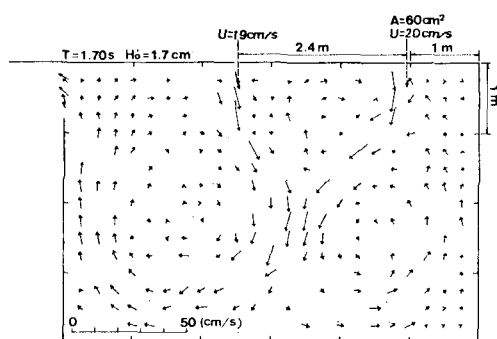


図-15 港内の流況

である。(a)は、開口部における平均流速が U の時の、開口部からの距離 X における最大流速 u_m を示している。ここで、 b_0 は開口幅の半値である。図中に示した破線は、二次元自由噴流の場合の経験式である³⁾。測定値は経験式の7割程度で、近似直線の傾きは2.50となった。測定値が二次元自由噴流の経験式より小さくなったのは、底面摩擦と流速の振動成分に因ると考えられる。

また、(b)に示したように、距離 X に対する最大流速の半値幅 $b_{1/2}$ は二次元自由噴流の経験式にほぼ一致した。

3.5 海水交換に有効な開口部配置

$6\text{m} \times 4\text{m}$ の矩形の泊地を持つ港をモデルとして検討した。予備実験として、開口部を1箇所設けた場合を観察したが、循環流が発生し、その中心付近は緩流速で浮遊物が集積しやすい。従って、泊地全域の清浄化を図るためには、泊地の規模を勘案して複数の開口部を設ける必要がある。そこで、開口部を2箇所設置した場合の流況の一例を図-15に示す。流速ベクトルは、ビデオ撮影したフロートから求めた。開口部平均流速は 20 cm/s であるが、泊地全体に流れが発生していることがわかる。泊地内の流れが定常になってから開口部から染料を注入してその拡がりを測定したところ、このケースでは5分程度で泊地全域が着色された。交換率は不明であるが、導入水はきわめて短時間で泊地全域に拡がることが予想される。

4. おわりに

以上の結果を利用して、潮位や波の入射角及び潜堤の構造を考慮した潜堤付防波堤による海水導入量の算定が可能である。また、港内が十分に広い場合の導入水の拡がり幅や最大流速の見積りが可能となった。さらに、開口部を数ヶ所設けることにより広範囲の海水交換を迅速に行えることがわかった。

今後は、任意の平面形状の泊地に対する最適な開口部配置の算定が可能な数値シミュレーションの開発が必要となろう。

最後に、本実験を実行するにあたり尽力して下さいした元東海大学生、大和田 聖、渡部 信の両君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 山本正昭・中泉昌光・間辺本文：潜堤付防波堤による海水交流工法の開発，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 675～679，1987。
- 2) 中泉昌光・山本正昭・間辺本文：潜堤付防波堤の波力に対する実験的研究，第35回海岸工学講演会論文集，pp. 632～636，1988。
- 3) N. ラジャラトナム (野村安正訳)：噴流，森北出版，pp. 1～25，1981。