

開口突出管付透過式防波堤の 水理特性に関する研究 —開口突出管内の流速特性について—

HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF THE PERMEABLE BREAKWATER WITH
A CYLINDRICAL SHAPED PROJECTING TUBE FOR SEAWATER EXCHANGE

橋本剛¹・多田彰秀²・糸洌長敬³

Tsuyoshi HASHIMOTO, Akihito TADA and Chyokei ITOSU

¹正会員 水修 西松建設株式会社 技術研究所 (〒242-8520 神奈川県大和市下鶴間 2570-4)

²正会員 博(工) 長崎大学工学部 助教授 社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1番14号)

³正会員 理博 東京水産大学水産学部 教授 沿岸域工学研究室 (〒108-8477 東京都港区港南 4-5-7)

It is important to keep sea water exchange in a fishing port especially when its internal space is utilized for aquaculture. Authors have developed a new type permeable breakwater with a cylindrical shaped projecting tube that has large cross section, and examined their hydraulic characteristics. Experiments showed that flows in the tube are not only dependent on pressure difference by water level inside and outside the port. Entrainment flow also gives an influence on the flow in the tube. Entrainment flow is caused by vertical flow outside the port, but its velocity could not be evaluated correctly by existing energy formulae. Authors developed a numerical model that describes the characteristics of the velocity, and examined the experimental results by the model. The newly developed formula will be useful to quantify and control the flow in the tube.

Key Words : Permeable breakwater, water exchange, tube, transmission coefficient, reflection coefficient, fishery harbor

1. 序論

閉鎖性の高い港湾や漁港では、過剰な栄養塩の流入に加え、港内の静穏を確保するために建設された防波堤等の施設によって海水交換が阻害されていることは少なくない。このため、港内では底質の有機物化、水質の悪化が問題となる場合も少なくない。特に、港内を蓄養に利用している多くの漁港では、水質の悪化が蓄養魚の減耗や出荷時の鮮度を左右するため、市場価格への影響が懸念され、港内の水質を保全する対策技術の早期開発が望まれている。また、日本海でおきた油濁海域の水産資源への消費者の購買動向からも推察できるように、環境問題や健康問題に消費者は非常に敏感に反応しており、消費者の購買意欲を減退させることに繋がる様なことは避けなければならない。

この様な現状を踏まえ、近年港内の海水交換能を高める施設として、複断面を有する多くの透過式防波堤が提案されている。また、港湾および漁港の建設あるいは建設計画に、このような透過式防波堤が積極的に採用されるとともに、一部の新型透過式防波堤に関しては実海域での実験結果も公表されてお

り、例えば、山本ら¹⁾によって港内の海水交換に貢献することが報告されている。しかしながら、猿川ら²⁾によれば、海水交換能を高めることは港内への伝達波高も大きくなるため、海水交換能を高く維持しながら港内の静穏を確保することは困難であることが報告されている。特に、長周期波浪に対する透過率の低減化対策は大きな課題である。さらに、これらの透過式防波堤は、複雑な断面構造を有することで、あるいは堤体の断面幅を広く確保することで透過率を低減させているため、建設コストが高騰する傾向にあり、コスト縮減と言った昨今の施策に逆行するような課題も抱えている。港内の水質改善を目的とした防波堤の一部改修を計画する場合、コストがかさむことなど、改修には解決しなければならない様々な困難が存在する。

筆者らは既往の閉鎖性の高い中小港湾をターゲットとし、港内の静穏を維持しつつ海水交換を促進することで、水質の改善あるいは保全する技術の開発を最終的な目標として研究に取り組んでいる。本研究では研究の初期段階として、港内の海水交換を促進する上で重要な役割をになう「開口突出管付透過式防波堤」の基本的な水理特性を明らかにすること

を目的とし、本防波堤の開口部形状を円筒型とした場合の開口突出管内の流動特性を水理実験に基づいて明らかにするとともに、管路非定常流のエネルギーの式から導出される管内流速に関する式の有効性について検討する。また、新たに管内流動特性を考慮した数値モデルを構築し、管内流速に関する式を提案する。

2. 開口突出管付透過式防波堤の特徴

本研究の対象となる「開口突出管付透過式防波堤」は、従来の直立防波堤から大孔径の開口管が港外側あるいは港内側に突出した形状の防波堤であり、開口突出管の方向、設置場所および本数などを適切に選択することで、港外側の波浪エネルギーを利用して港内の海水を効率よく交換させる機能を有したものである。写真-1は、本研究で用いた開口突出管付透過式防波堤水理模型の全景写真である。

開口突出管付透過式防波堤は直立式防波堤の形状を基本にしているため、既存の中小港湾や漁港の港内水質改善あるいは水質保全を目的とした防波堤の1部改修工事を現状の景観を損ねることなく容易に実施できるだけでなく、改修工事の経費縮減にも大いに貢献するものと考えられる。また、既往の透過式防波堤に比べて単純な断面形状を有し、堤幅を小規模化することができるため、新規港湾建設計画においても、港内における利用可能面積を広く確保することができ、建設費の縮減も期待できる。

3. 水理模型実験

水理模型実験は西松建設株式会社所有の2次元造波水槽を用いて実施した。表-1は水理模型に関する諸元を示したものであり、表-2は実験の諸元を示したものである。

水理模型は縮尺を想定する実海域サイズの1/20とし、管路内の流動状況の観察を可能とするため、透明なアクリルを用いて製作した。また、実験条件として模型形状をパラメータとしたため、管路のパーツと8つの箱状パーツに分割できる組立て式を採用した。すなわち、模型を組立て式とすることで、開口突出管の口径（ d ）、管の突出長（ ℓ ）、管の突出方向（港外側あるいは港内側）並びに管の設置水深（ h_s ）を実験パラメータとして変化させることができる。水理模型は造波板より30mの地点に設置し、便宜上、造波板側を港外側、模型を挟んだ反対側を港内側としている。また、港内外の水の交換は連通した開口部を通してのみ可能のように工夫した。

図-1は実験概要の断面図である。港外側並びに港内側に波高計を12本設置し、堤体直前の水位変動を計測するとともに、港外側の波高計データを用いて合田の方法により防波堤に作用する入射波波高（ H_i ）並びに反射波波高（ H_r ）を算出して反射率（ $K_r=H_r/H_i$ ）を求め、算出した入射波高と港内側の

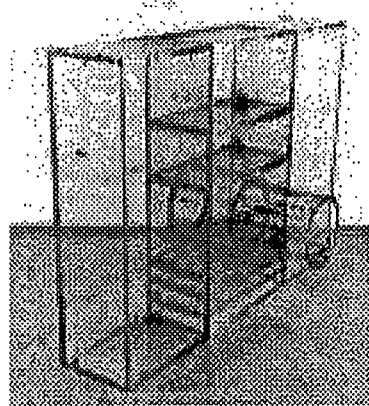


写真-1 開口突出管付透過式防波堤水理模型全景

表-1 水理模型諸元（縮尺 1/20）

	実機諸元	模型諸元
高さ（ H ）	14.0（m）	70（cm）
横幅（ L_s ）	20.0（m）	100（cm）
奥行（ B ）	4.0（m）	20（cm）
口径（ d ）	2.0～3.2（m）	10～16（cm）
突出長（ ℓ ）	0～6.0（m）	0～30（cm）

表-2 実験諸元

	実機諸元	模型諸元
設定水深（ h ）	8.0（m）	40（cm）
設置水深（ h_s ）	2.6～4.6（m）	13～23（cm）
設定波高（ H_i ）	0.5～1.0（m）	2.5～5.0（cm）
設定波長（ L ）	29.5～73.4（m）	146.25～369.28（cm）
設定周期（ T ）	4.5～8.9（s）	1.0～2.0（s）
設定波速（ C ）	6.6～8.2（m/s）	146.3～184.6（cm/s）

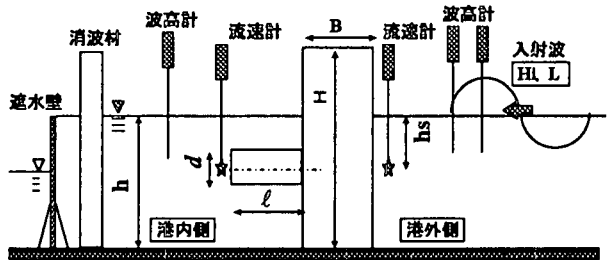


図-1 実験概要断面図

伝達波高（ H_t ）とを用いて透過率（ $K_t=H_t/H_i$ ）を求めた。開口部両端では電磁流速計を各々1台ずつ設置し、流速を計測した。管内側の天端並びに底面にボタン式波圧計を管長にあわせて設置し管内に作用する波圧も測定した。サンプリングは1ケースにつき50Hzの間隔で90s間計測し、AD変換するとともにパーソナルコンピュータで記録した。なお、実験の水深は $h=40\text{cm}$ と一定とし、造波した設定波は、周期 $T=1.0\sim 2.0\text{s}$ を0.2s間隔で6種類、設定波高（入射波高）を $H_i=2.5, 5.0\text{cm}$ の2種類の規則波とした。

4. 実験結果

(1) 透過率・反射率の特性

図-2は $h=40\text{cm}$ 、 $h_s=18\text{cm}$ 、突出管の突出方向を港内側とした場合の入射波周期（ T ）に対する透過率

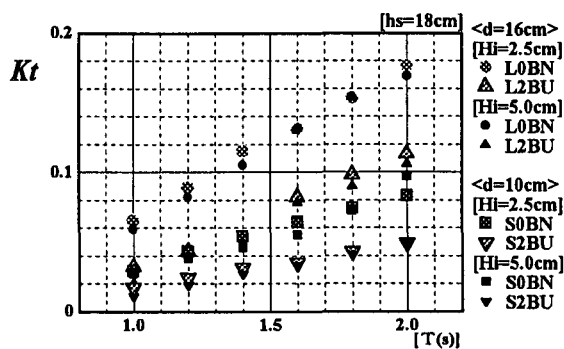
(K_t) をプロットしたものである。実験パラメータは口径 (d)、入射波高 (H_i)、管の突出長 (ℓ) である。この結果に基づけば、突出長が $\ell=0\text{cm}$ の場合は本実験条件における長周期側の波 $T=2.0\text{s}$ に対して K_t は最大17%程度の値を示している。しかしながら、 $\ell=20\text{cm}$ とすることで K_t は長周期側でも11%程度にまで低減されることが分かる。また、口径を $d=16\text{cm}$ から $d=10\text{cm}$ と小さくすることでも突出長を増加させることと同等の透過率低減効果が期待できる。言い換えれば、透過率は突出管の突出長並びに開口部の口径に強く依存するものと考えられる。また、波高の変化に透過率はあまり依存せず、波周期に強く依存する。橋本ら³⁾によれば、透過率は上述した傾向に加えて、開口部が没水している場合には設置水深並びに突出方向に強く依存しない。さらに、反射率については、特に著しい傾向は認められず、全ての場合において9割以上の値となることが確認されており、直立式防波堤と同様に高い反射性能を有している。

(2) 管内の流体運動特性

図-3は、管突出方向が港内向きで、 $h=40\text{cm}$ 、 $H_i=5.0\text{cm}$ 、 $T=1.8\text{s}$ 、 $\ell=20\text{cm}$ 、 $d=16\text{cm}$ 、 $h_s=18\text{cm}$ とした場合の港外側水位変動 (η_i)、管内流速変動 (V_p)、港外側管内圧力変動 (p_i) 並びに港内側管内圧力変動 (p_t) の計測結果を時系列で示したものである。特に、圧力計は港外側あるいは港内側ともに管内天端の開口部端より10cmの位置に設置されていたものである。図-4は、図-3と同一の実験条件下で、時間とともに変化する管内流速変動 (V_p)、波周期幅で移動平均化した管内流速 ($\bar{V}_p$)、同様に周期移動平均化した開口部における港内側の水位変動 ($\bar{\eta}_t$) 並びに港外側の水位変動 ($\bar{\eta}_i$) を表している。図中の数値は、静水時を各物理量のゼロ点としている。流速に関する値は港外側から港内側に流れる場合を正とし、水位変動については水面の鉛直上向き方向位置、圧力変動に関しては管壁を垂直に押す力を正として表示している。また、図中に示す領域Aは図-3、図-4において同じ時間領域を示している。

図-3中の領域Aで η_i の振幅変動は安定していることがわかる。この時の防波堤の港外側水位の振幅は、入射波振幅の約2倍の約5.0cmで重複波を示している。

管内圧力の変動は、港外側変動幅の方が大きな値を示すとともに、管内の港内側並びに港外側の波圧変動に位相差は認められず、 η_i の周期変動によく追従していることがわかる。一方、 V_p は進行波が到達するに従い正の領域で変化をはじめが、時間領域Aでは η_i と同様に周期的な変動に安定する。計測初期における港内への水の流入は、図-4に明ら



L0BN : $d=16\text{cm}$, $\ell=0\text{cm}$, $h_s=18\text{cm}$
 S0BN : $d=10\text{cm}$, $\ell=0\text{cm}$, $h_s=18\text{cm}$
 L2BU : $d=16\text{cm}$, $\ell=20\text{cm}$, $h_s=18\text{cm}$, 港内側突出
 S2BU : $d=10\text{cm}$, $\ell=20\text{cm}$, $h_s=18\text{cm}$, 港内側突出
 図-2 開口突出管付透過式防波堤の透過率

かなように港外側の平均水位の上昇によるものと考えられる。さらに、図-3において港外変動がほぼ一様である領域Aにおける η_i 、 V_p 並びに p_i の周期性に着目すれば、 η_i と p_i のには位相差が認められない。しかしながら、 η_i と V_p には $\pi/4$ の位相差が存在する。これらは、微小振幅波理論に基づく重複波の性質を示し、領域Aにおける管内の流体の運動は港外側に形成される重複波の運動特性に支配されることを示している。また、図-4に示した管内流速と港内外水位の周期移動平均値は領域Aの時間帯において、ほぼ様な値を示す。図-3、図-4に示したケース以外でも領域Aのような時間領域が存在し、このような領域の特徴として、値の大きさが異なるものの、 $\bar{V}_p$ が負を示すことが確認されている。すなわち、管内の水塊が港内側から港外側へ移動している。このような現象は $\bar{\eta}_i < \bar{\eta}_t$ 関係の下であれば、特別に問題となることもないが、図-4中の領域Aにおいては僅かな差であるが $\bar{\eta}_i > \bar{\eta}_t$ の関係が成立しているにもかかわらず、 $\bar{V}_p$ は負の値を示している。言い換えれば、港外側水位が港内側の水位に比べて高い場合でも管内の平均的な水の移動が港外側へ向うことを示しており、管内の流動が港の内外水位差だけに支配されていないことが分かる。

(3) 管内流速特性

実験結果から得られた時系列データに基づいて管内の運動特性について上述してきた。次に、本防波堤が管路を有する構造を持つことから管内流速を評価する必要がある。ここでは管路非定常流に関するエネルギー式の適用を試みるとともに、その有効性について検討する。

a) 管路非定常流に関するエネルギーの式

管路非定常流に関するエネルギーの式は(1)式として表現される。ここに、 g : 重力加速度、 u : 管内

突出管突出方向 (港内側), 突出管長 (40cm) 管径 (16cm), 管設置水深 (18cm)
水深 (40cm), 波周期 (1.8s), 設定入射波高 (5.0cm)

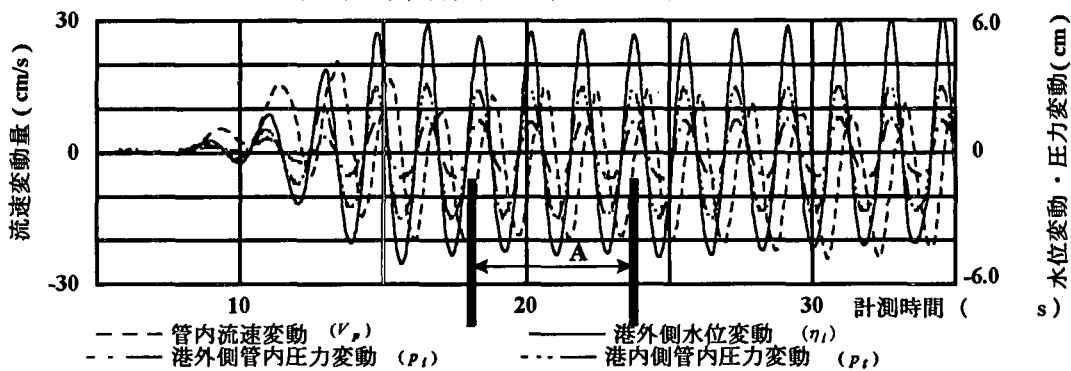


図-3 港外側水位・管内流速・管内圧力の時系列変動

突出管突出方向 (港内側), 突出管長 (40cm) 管径 (16cm), 管設置水深 (18cm)
水深 (40cm), 波周期 (1.8s), 設定入射波高 (5.0cm)

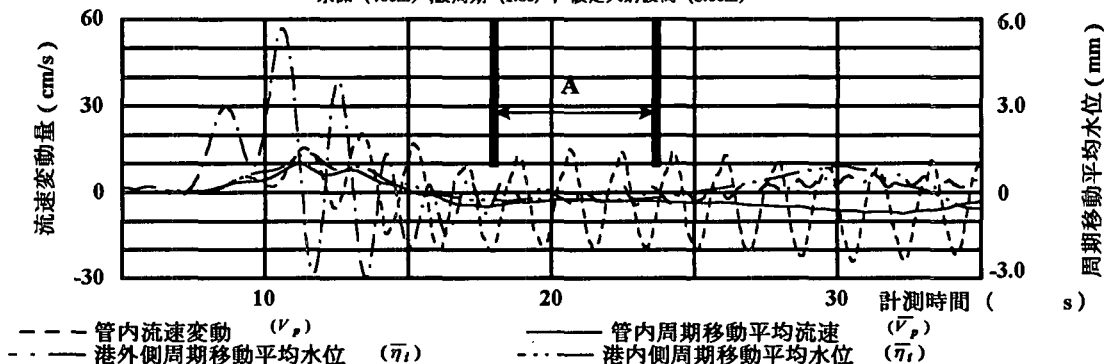


図-4 管内流速・管内移動平均流速と周期移動平均水位の時系列変動

流速, ρ : 流体の密度, Δp : 開口部両端に生じる圧力差, f_e : 入口損失, f_o : 出口損失, f_b : 曲り損失, n : マニングの粗度係数である。

$$\frac{(\ell+B)}{g} \frac{du}{dt} + f_a \frac{|u|u}{2g} - \frac{\Delta p}{\rho g} = 0 \quad (1)$$

$$f_a = 1 + f \frac{(\ell+B)}{d} + f_e + f_o + f_b \quad (2)$$

$$f = 12.7 g n^2 / d^{1/3} \quad (3)$$

b) 管内流速に関する予測値と実験値との比較

図-5は、図-3および図-4と同一の実験条件下で得られた管内流速の実測値 V_p と、(1)式に次の入力条件をもちいて求めた管内流速の計算結果とを比較している。入力条件として、 $g=9.8\text{m/s}^2$, $f_e=0.5$, $f_o=1.0$, $f_b=0$, $n=0.009\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ を与えるとともに、 Δp には港外側に設置した波高計で計測したデータを用いて、微小振幅波理論に基づく波の運動に伴って生じる圧力変動量を与えている。図-5より、計算結果の変動周期についてはほぼ実測値と一致しているものと評価できる。また、波が到達しはじめる12s程度までは両者の値についても一致する傾向が見られる。この計測時間帯は図-4に見られる港外側の周期移動平均水位が上昇している時間に相当

している。しかしながら、領域AではSet Upの効果が発著でなくなり、港外側平均水位が安定するとともに、計算結果の振幅は実測値のそれよりも大きくなっている。すなわち、管内流速の最大値を過大に評価してしまうことが判明した。言い換えれば、開口突出管付透過式防波堤の管内流速を予測計算するために(1)式を用いることについては、さらに検討する必要があるものと考えられる。

大村ら⁴⁾は、(1)式を用いて、潜堤付海水導入工の管内流速を十分に評価できることを示している。評価を可能にしている大きな要因の一つは、港外側領域のSet Up効果によって、港外側水位を港内より常に高く維持させていることで一方向の流れを作り出していることである。このことは、開口突出管付透過式防波堤の管内流速に関しても、図-5の結果から、Set Up効果が確認される計測初期段階において、一応の評価が得られることから考えられる。さらに、彼らは管路の長さを非常に長くし、管路内の水塊の慣性力を増加させることで、管内の振動が抑制され、Set Upによる一方向の流れの効果が高められたとも報告している。すなわち、(1)式は一方向流が卓越する管内の流速を評価するには有効であるが、港外側における重複波の周期変動を受けやすい比較的管路の短い開口突出管内の運動を評価するには有効でない。

管内の流動が港外側水位の変動に追従する結果に加え、管内の異なる位置での圧力変動に位相差が認

突出管突出方向（港内側），突出管長（40cm）管径（16cm），管設置水深（18cm）
水深（40cm），波周期（1.8s），設定入射波高（5.0cm）

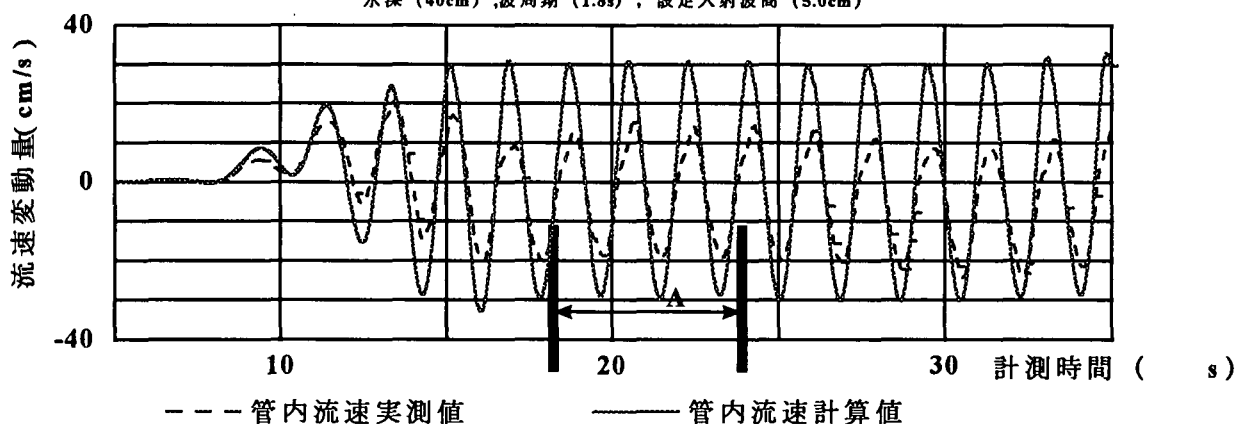


図-5 管内流速の実測値と計算値の時系列変動

突出管突出方向（港内側），突出管長（40cm）管径（16cm），管設置水深（18cm）
水深（40cm），設定入射波高（5.0cm）

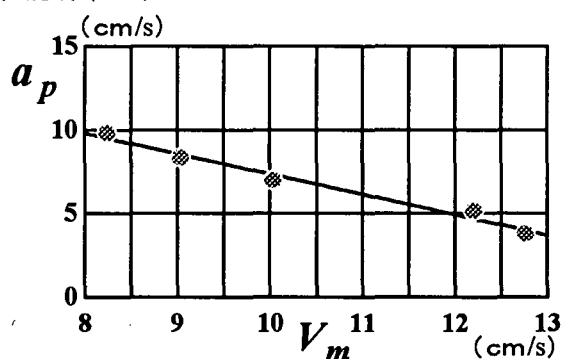
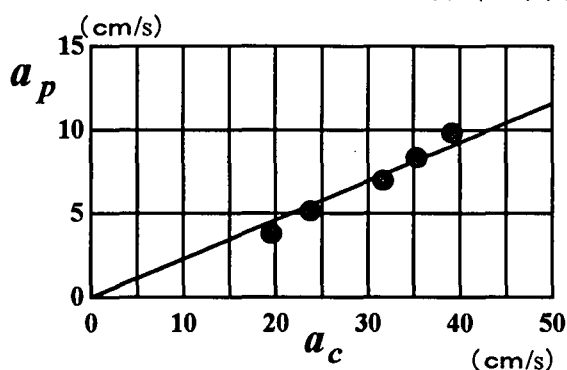


図-6 実測流速振幅と港外水位に基づく計算流速振幅 図-7 実測流速振幅と重複波の鉛直方向流速振幅

められないことから、開口突出管内の流体運動は、管壁によって限定されたある体積を持った水塊が港外側の重複波の運動に支配されることによって成立しているものと考えることができる。

ここで、(1)式の左辺第2項を無視するものとして考え、港外側の水位変動のみによって流速を評価してみることにした。図-6はこの考えに基づいて領域Aにおける港外側波高データから計算される管内流速の振幅 ($a_c = g a / \sigma (\ell + B)$, a : 領域Aにおける港外側水位変動の実測振幅, σ : 角周波数) と領域Aにおける管内実測流速の振幅 (a_p) とを比較したものである。図におけるパラメータは波周期 (T) のみであり、 $h=40\text{cm}$, $h_i=5.0\text{cm}$, $\ell=20\text{cm}$, $h_s=18\text{cm}$, $d=16\text{cm}$, 突出管の突出方向=港内側の同一条件下でプロットしている。この図より、 a_c が a_p の約4倍の値を示すことから、港外側の水位変動だけで管内流速を評価することは有効でないことが分かる。また、(1)式の港外側の水位変動が管内流速を過大に評価する原因の一つであることが確認できる。さらに、管内流速の振幅は入射波が長周期側であるほど大きな値を取るから、管内の流速は波周期に依存することもこれより判断できる。

c) 管内流速と重複波の関係

図-7は、図-6と同一の条件下で、領域Aにおける

港外側波高データを用いて、重複波理論から求められる重複波の腹における鉛直方向流速の最大値 ($V_m = a \sigma \sinh k(h + h_s) / \sinh kh$, k : 波数)

に対する a_p をプロットしたものである。この図より、開口突出管内の流速は港外側における重複波の鉛直方向流速にも依存していることが確認できる。

図-8は口径をパラメータとして領域Aにおける V_m に対する $\bar{V}_p$ の値をプロットしている。これより、領域Aにおける管内の周期移動平均流速 $\bar{V}_p$ は負の値を示すとともに、 $\bar{V}_p$ は V_m と管の形状に応じた相関関係を有することが分かる。また、 $\bar{V}_p$ は周期に依存する値であることも確認される。以上のことから、開口突出管内の水塊は港外側の重複波による鉛直方向流速に港外側へ連行されているものと考えられる。特に、口径が小さくなることで、 $\bar{V}_p$ が港外向きを示すのは、管内の体積が小さくなり、水塊が港外側の重複波の鉛直方向流速に連行されやすくなっているためと推察される。なお、口径によって、 $\bar{V}_p$ の V_m に対する傾向が異なるのは、連行現象に加え、水位変動の周期性や平均水位の変動特性にも管内流速が依存するため、これら要因が管内の流速変動に相互に影響するためと考えられる。

5. 数値モデル

前述してきた管内流速の特性をもとに新しい数値モデルを構築し、定式化を試みる。図-9は構築した数値モデルの概念を示した図である。

開口突出管内の水塊は港内外の水位差によって生じる開口部端における圧力差 ΔP によって運動するものと考えられる。すなわち、管内の水塊の運動量と圧力差によってなされる仕事量が釣り合うものと仮定すれば、(4)式を得ることが出来る。但し、開口部前後で生じる圧力差 ΔP は(5)式に示すように港外側と港内側の水位差 η によって決定される。実験結果より透過率が小さいことから、導出する式の単純化も考慮して、モデルでは、港内側の水位は静水面として取り扱うものとする。このため、 η は(6)式に示すように重複波の波高(H_D)をもちいて港外側壁面における微小振幅波理論に基づく重複波の水位変動として与えることができる。このような関係から管内の流速変動 V_p は(7)式として表現される。一方、 V_p は港外側における重複波の鉛直方向最大流速 V_m に依存する連行の影響も受けると考えられるため、(7)式の右辺第2項の $const.$ に V_m と未知定数 ε とを用いて定義される連行流速 εV_m を代入し、(8)式として表すことが出来る。また、図-8の関係から(9)式を導くことができ、未知定数 ε は $\bar{V}_p$ と V_m とを用いて実験結果から決定することができる。

$$\Delta P \frac{\pi}{4} d^2 = \rho(\ell + B) \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\partial V_p}{\partial t} \quad (4)$$

$$\Delta P = \rho g \eta \quad (5)$$

$$\eta = \frac{H_D}{2} \sin \sigma \quad (6)$$

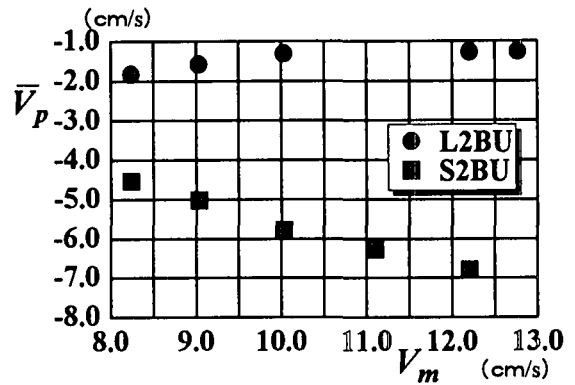
$$V_p = -\frac{g H_D}{2\sigma(\ell + B)} \cos \sigma t + const. \quad (7)$$

$$V_p = -\frac{g H_D}{2\sigma(\ell + B)} \cos \sigma t + \bar{V}_p \quad (8)$$

$$\bar{V}_p = \varepsilon V_m \quad (9)$$

6. 結論

本研究では、開口突出管付透過式防波堤の開口部を円筒型にした場合の水理特性を明らかにすることを目的として、水理模型実験を実施した。特に、開口突出管内における水塊の運動特性について、実験結果に基づいて考察を加え、管内の運動が港内外の水位差のみに依存するばかりでなく、港外側に卓越する重複波の鉛直方向流速の作用によって生じる連



L2BU : $d=16\text{cm}$, $\ell=20\text{cm}$, $h_s=18\text{cm}$, 港内側突出

S2BU : $d=10\text{cm}$, $\ell=20\text{cm}$, $h_s=18\text{cm}$, 港内側突出

図-8 領域Aにおける V_m に対する $\bar{V}_p$

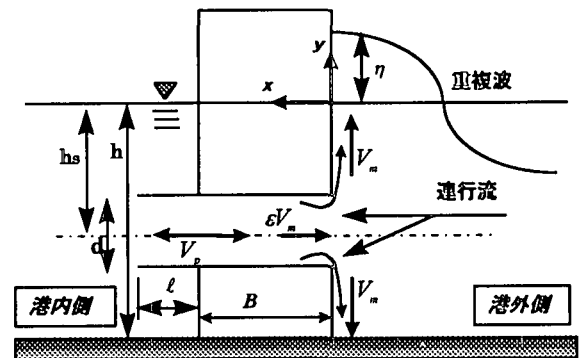


図-9 数値モデル概念図

行の影響も受けることを明らかにした。また、既往の管路のエネルギー式を用いて管内の流速変動の評価を試みた。その結果、既往の理論式では、開口突出管内の流速を過大に評価してしまうため、管内流速を予測計算するには不十分であると判断された。さらに、管内流速の特性を考慮して、数値モデルを構築し、実験結果から導出される未知定数 ε を用いた管内流速に関する定式化を行った。今後、導出した式を用いて定量化を実現するとともに、管内の流動を調整する方法について検討する。

参考文献

- 1) 山本潤・竹内智行・中山哲蔵・田畑真一・池田正信: 志賀島漁港外港の導水工による環境改善効果に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 1096-1100, 1994.
- 2) 猿川弦・水野雄三・笹島隆彦・木村克俊・高橋哲美: 消波ブロック被覆型有孔堤の海水交換特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 971-975, 1993.
- 3) 橋本剛・多田彰秀・糸淵長敬: 開口突出管付透過式防波堤の水理特性に関する研究—開口突出管の形状変化に伴う波の透過率について—, 平成10年度日本水産工学会学術講演会講演論文集, pp. 57-58, 1998.
- 4) 大村智宏・中山哲蔵・前川拓司: 潮位差が大きい漁港での波浪エネルギーによる海水交換の検討, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 986-990, 1997.

(1999. 4. 19受付)