

# 複列潜堤によるシルテーションの高能率防止策に関する研究

小野 信幸\* ・ 入 江 功\*\* ・ 竹内 伸夫\*\*\*  
青 木 聡\*\*\*\* ・ Rahman Hidayat\*\*\*\*\*

シルテーションによる航路埋没の防止対策として、従来は逆T型潜堤が設置されているが、その阻止機能は必ずしも十分とはいえない場合がある。また、潜堤の設置は船舶航行や底引き網漁業に対して障害となるため、潜堤の形状やその天端を可能な限り低くする工夫が必要とされている。本研究は、「逆T型潜堤」と著者らが埋没防止に最適な断面形状として提案した「逆V型潜堤」を組み合わせた複列潜堤による埋没防止対策を提案し、その効果を水槽実験と数値計算により調べたものである。その結果、逆T型和逆V型潜堤を並列に配置するT<sub>2</sub>V型潜堤が埋没対策として最も効果的であることが明らかとなった。

## 1. はじめに

シルテーションとは、粘土・シルトなどの微細粒子からなる泥土が波や流れにより運ばれ、航路や泊地に堆積する現象であり、船舶の航行等にしばしば支障をもたらすことが知られている。シルテーションの主要因は、海底付近に形成される高濃度浮泥層 (fluid mud) の流動であり、熊本港ではこれを阻止するため、図-1 のような逆T型潜堤を設置する対策が1992年より実施されている。現地実施例の追跡調査結果(Hidayat ら, 2001)によれば、潜堤の設置が航路埋没防止に有効であることを示しているが、その埋没阻止機能は必ずしも十分とはいえない場合もあるようである。また、近年では、船舶航行の安全性や漁業への影響を抑えるために、潜堤高をできる限り低くする工夫が必要とされている。

著者ら (2001) はこれまで、浮泥の流動状況を詳細に観察することが可能な実験水槽を用いて、埋没防止効果の高まる条件や形状について検討してきた。その中で、潜堤上を越流する浮泥が渦によって静水と攪拌混合されると浮泥濃度が低下して沈降速度が遅くなるため航路に堆積しにくくなること、逆に、航路外側の浮泥が堆積している側では、渦の発生を抑制して浮泥を乱さない方が埋没防止効果が高められることを実験的に確認した。しかし、潜堤高を可能な限り低くすることを考えると、相対的に浮泥の越流量が大きくなるため、越流浮泥の濃度低下を促す工夫が必要となる。本研究では、潜堤を複列に配置して越流浮泥の濃度低下を促し、効果的に埋没量を低減する方法について検討する。複列潜堤周辺の浮泥流動状況を水槽実験により詳細に観察し、また、浮泥の流動を再現する密度流モデルと潜堤周辺の流れ場を解析するFEMモデルを用いた2種類の数値シミュレーションにより、複列潜堤の埋没防止効果と最適な配置条件について調べる。

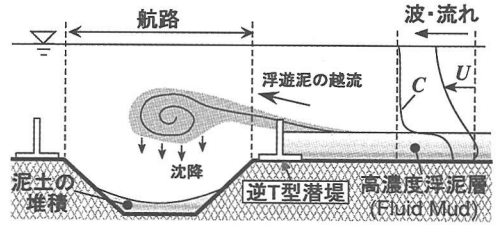


図-1 潜堤によるシルテーション対策

## 2. 浮泥の流動実験

### (1) 実験方法

実験には、図-2 に示す長さ3m、高さ1m、幅0.2mの水槽を用いた。この水槽は、高濃度浮泥層の流動をよく可視化できるように幅を可能な限り薄くしており、これを薄型水槽 (Slim-tank) と呼んでいる。水槽内には、3枚の仕切板 (gate A, B, C) があり gate A-B 間を攪拌槽と呼び、gate B-C 間には航路を模した落ち込み部を設けてある。また、この水槽では、ポンプにより潮流のような流れを、また加振機と連結された潜堤を左右に動かすことにより波作用時の現象を再現できることが特徴である。実験の手順は、水槽中央に潜堤模型を設置して水深40cmとなるよう水を張った後、gate AとBを閉じて攪拌槽内の濃度が20 g/lとなるよう所定量の底質を投入して十分攪拌し、その後、静置して浮泥の界面高が底面から10cmの高さとなるまで待つ。その後、流れを作用させる実験では、gate AとBを静かに引き上げて浮泥を潜堤と泥止め間に一様に広げ、更に浮泥厚  $h_f$  が所定の高さとなったところでポンプにより流れを30秒間作用させた (流れの向きは図中右から左)。また、波を作用させる実験では、浮泥厚が所定の高さとなったところで gate B を引き上げると同時に加振機を振幅3.5cm、周期2s (水深40cmの場所を波高5cm、周期2sの波が通過する条件に相当) で120秒間往復運動させた。実験中

\* 正 会 員 博(工) 九州大学大学院助手 工学研究院環境都市部門

\*\* 正 会 員 工 博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門

\*\*\* 正 会 員 工 修 東亜建設

\*\*\*\* 学生会員 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻

\*\*\*\*\* 正 会 員 工 修 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻

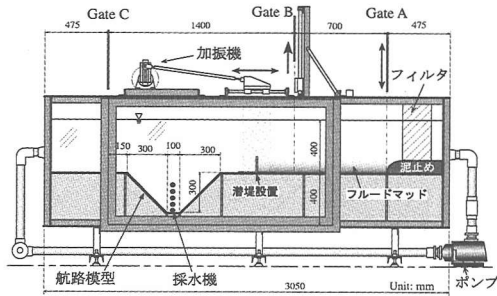


図-2 実験水槽 (Slim-tank)

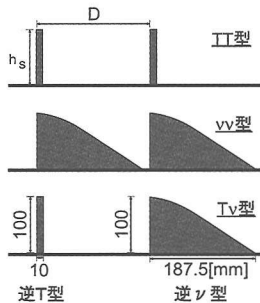


図-3 潜堤の形状と複列潜堤の組み合わせ

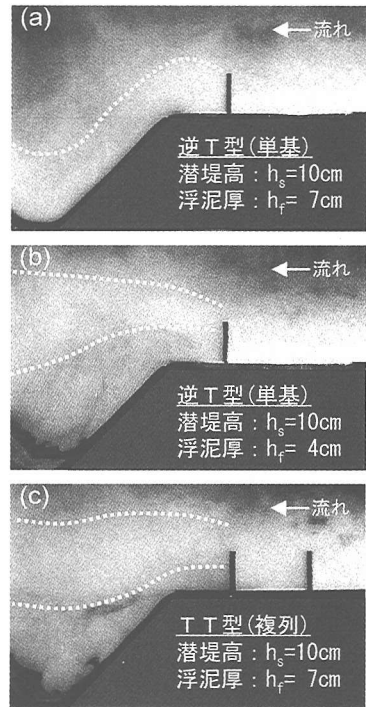
は浮泥が潜堤上を越流していく様子をビデオ撮影し、ポンプや加振機を止めて90秒後に航路中央部の底面付近で採水し(底面から5cm間隔で計5点)、浮泥濃度を測定した。

実験で用いた潜堤の形状を図-3に示す。熊本港で適用されている逆T型潜堤と、著者ら(2001)が埋没防止に最適な形状として提案した逆V型潜堤を用い、これらを組み合わせたTT型、vv型、Tv型の3タイプの複列潜堤について実験をおこなった。潜堤の高さ( $h_s$ )はいずれも10cmである。また、実験でフルドマッドの作成に用いた底質は、カオリナイト(平均粒径 $0.6\mu\text{m}$ 、比重2.6、白色粘土)である。

## (2) 実験結果

### a) 浮泥流動状況の特徴

実験で観察された浮泥の流動状況で特に特徴的な現象がみられたものを図4、5に示す。図-4は、断面平均流速 $7\text{cm/s}$ の流れを作用させて30秒後の浮泥流動状況の写真であり、図-4(a)、(b)は逆T型潜堤を単基設置して初期浮泥厚 $h_f$ を7cmおよび4cmとした場合、(c)はTT型潜堤(複列)で $h_f=7\text{cm}$ とした場合である。単基設置で浮泥厚の異なる図-4(a)、(b)を比較すると、(a)の場合は潜堤を越えた浮泥のうち高濃度の部分が航路の落ち込みに沿って流入しているのに対し、(b)の場合は浮泥が航路の上層を通過している。これは、浮泥厚に対し潜堤高が相対的に高いことによる阻止効果とともに、

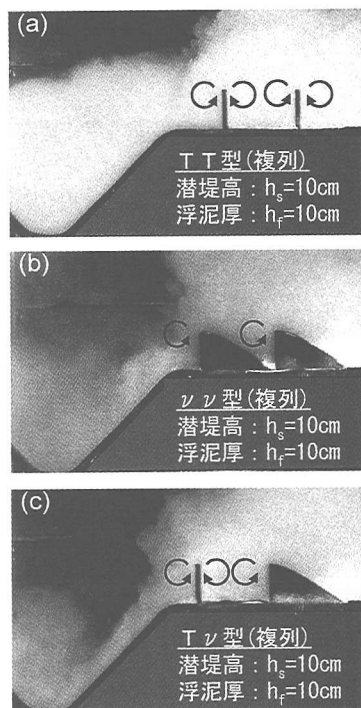
図-4 流れ作用下の浮泥流動状況 ( $U_s=7\text{cm/s}$ , 30s後)

潜堤頂部から生じる渦による攪乱作用で越流する浮泥の濃度が拡散混合により低下し、結果として底質の沈降速度が減少するためである。複列潜堤(c)の浮泥流動状況は(b)の場合とよく似ており、これは複列化により浮泥を攪乱する効果が増加したためである。つまり、潜堤の複列設置は潜堤高を高くしたと同じ効果をもたらすと考えられる。

図-5は潜堤形状の組み合わせが異なる複列潜堤に対し、波を120秒間作用させた場合の浮泥流動状況である。図-5(a)~(c)を比較すると、TT型潜堤において浮泥が航路内へ大量に流入したことがわかる。これは波による大規模な渦が浮泥を巻き上げるためであり、一方、vv型とTv型では上流側(右側)に逆V型潜堤が設置されているため、後流渦による浮泥の巻き上げが生じず、航路内への流入浮泥量はTT型に比べて著しく減少している。

### b) 航路内濃度の測定結果

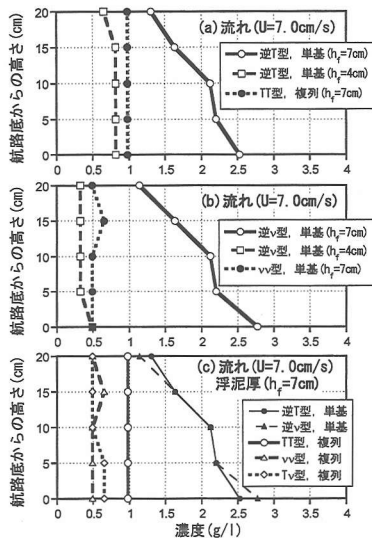
実験では航路内へ流入した浮泥濃度を採水により測定した。図-6は、流れ作用下( $U=7\text{cm/s}$ )において、逆T型潜堤、逆V型潜堤及びそれぞれを複列設置した場合の航路内の濃度測定の結果である。濃度の絶対値としては、逆T型と逆V型潜堤ともに、いずれの流速に対しても濃度は大きい順に、単基( $h_f=7\text{cm}$ )>複列( $h_f=7\text{cm}$ )>単基( $h_f=4\text{cm}$ )である。濃度分布の形状に着目すると、単基の浮泥厚7cmのケースでは、底面付近が高濃



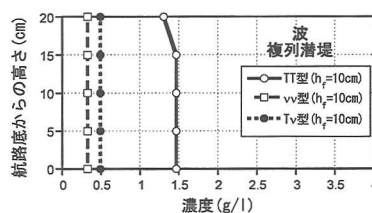
図—5 波作用下の浮泥流動状況 ( $H=5\text{ cm}$ ,  $T=2\text{ s}$ ,  $120\text{ s}$  後)

度で底面から離れるにつれて濃度が小さくなっているが、単基の浮泥厚  $4\text{ cm}$  と複列の浮泥厚  $7\text{ cm}$  の場合は、どちらも鉛直方向にほぼ一定値である。これは、流動状況の観察結果にみられたように、単基 ( $h_f=7\text{ cm}$ ) の場合には越流浮泥が航路の落ち込みに沿って流入し、それ以外の条件では航路の上層を浮泥が通過していたという、浮泥の流動状況の違いによるものと考えられる。複列潜堤の濃度が小さく鉛直方向に様な濃度となったのは、複列化により越流浮泥がよく攪拌されたためである。また、各種組み合わせの複列潜堤に対する濃度分布を比較したものを図—6(c)に示す。図中には、単基設置の場合の濃度分布も同時に示しており、複列潜堤ではその組み合わせによらず、単基設置の場合より低い濃度となっている。しかし、複列潜堤同士で比較すると、流れ作用下の条件では、潜堤の組み合わせによる違いはあまりみられないようである。

図—7は、波が作用した場合の濃度の測定結果であり、3種類の複列潜堤について比較している。図より、VV型とTV型潜堤の場合の濃度がTT型潜堤の場合に比べて小さいことがわかる。これは、図—5の写真にみられたように、波の存在下では浮泥側に逆V型潜堤を設置した場合に、渦による底質の巻き上げが生じなくなるためである。



図—6 航路底部の濃度分布の比較



図—7 航路底部の濃度分布の比較

### 3. 複列潜堤の効果の解析

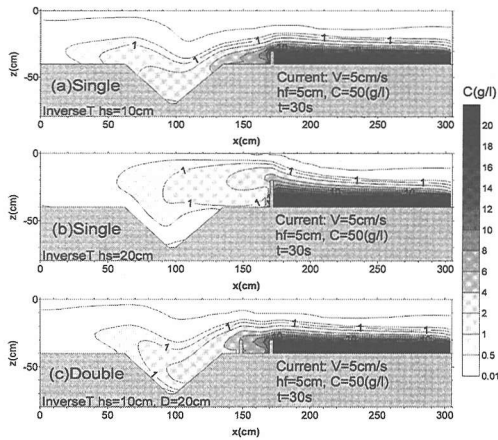
水槽実験の結果は、潜堤の複列設置により埋没防止効果が高まることと、潜堤周辺での渦の形成が埋没防止効果に関わる重要な要素であることを示した。本研究では、さらに、浮泥の流動を再現する密度流モデルにより浮泥濃度や流れの強度が異なる条件下での複列潜堤の効果を調べ、FEMモデルにより潜堤周辺の流れ場を解析して渦の形成状況を調べた。

#### (1) 複列化潜堤による航路埋没量の低減効果

密度流モデルの基礎式は、以下のような連続の式 (式 (1), (2)), 運動方程式 (式 (3)), 濃度の移流拡散式 (式 (4)), 状態方程式 (式 (5)) である。これらを、鉛直2次元の多層モデルとして差分化し時間発展的に解いた。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz = 0 \quad (\text{水面}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$w + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{z_k} u dz = 0 \quad (\text{水中}) \quad \dots\dots\dots (2)$$



図—8 浮泥流動状況の計算結果

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( N_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{gn}{h^{1/3}} u |u| - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_k}^0 \rho dz \dots \dots \dots (3)$$

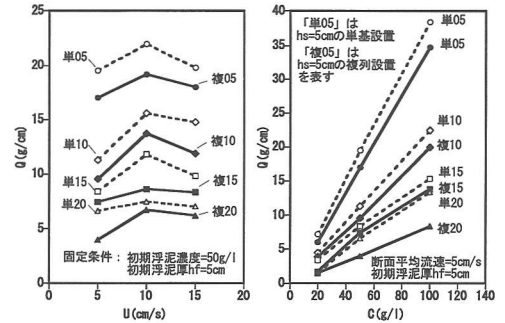
$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(cu)}{\partial x} + \frac{\partial(cw)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial(cw_f)}{\partial z} \dots \dots \dots (4)$$

$$\rho = \rho_w + (\rho_s - \rho_w) c \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $t$ は時間、 $x, z$ は水平・鉛直方向の座標、 $h$ は水深、 $\eta$ は水面変位、 $u, w$ は水平・鉛直流速、 $c$ は浮泥濃度、 $w_f$ は底質沈降速度、 $n$ はマンニングの粗度係数、 $\rho$ は密度、 $\rho_s$ は土粒子密度、 $\rho_w$ は水の密度である。また、 $N_x, N_z$ は水平・鉛直方向の粘性係数、 $K_x, K_z$ は水平・鉛直方向の拡散係数で、これらは密度成層の効果を取り入れるためリチャードソン数の関数として与えた。計算は、実験と同スケールの計算領域を設定し、潜堤の片側に  $h_f = 5$  cm で濃度  $50$  g/l の浮泥を配置して初期条件とし、側方境界から対数分布則に従う流速分布を与えた。

図—8は、逆T型潜堤の単基設置((a)  $h_s = 10$  cm, (b)  $20$  cm)と複列設置((c)  $h_s = 10$  cm)に流速  $5$  cm/s の流れを作用させた場合の浮泥の流動状況について、計算開始  $30$  秒後の浮泥濃度分布を示したものである。図—8(a)と(b)を比較すると、潜堤高が高いほど浮泥の流入をよく阻止し、且つ越流浮泥の挙動が航路上層を通過する結果となっている。また、図—8(a)と(c)を比較すると、複列潜堤のほうが航路埋没が生じにくくなっており、実験の観察結果と同じ特性が再現されている。

図—9は、単基設置した場合と複列潜堤間隔  $D = 20$  cm の  $120$  秒後の埋没量(航路の落ち込み部に流入した浮泥量の積分値)について比較した結果である。図で左は初期濃度を一定として流速を変化させた場合、右は流速



図—9 航路埋没量の比較 (120 s 後の計算結果)

を一定として初期濃度を変化させた場合を示している。各図には単基と複列の場合の埋没量を同時に示し(単05は、単基で  $h_s$  が  $5$  cm であることを示す)、複列潜堤の埋没量は、全ての条件で潜堤高が等しい単基設置の場合よりも小さくなっている。この図から、複列化による埋没量の低減効果を見積もと、複列設置時の航路埋没量は同じ潜堤高の単基設置の場合の約  $80\%$  であった。

## (2) 複列潜堤の最適な設置法について

水槽実験の結果、潜堤の断面形状が及ぼす埋没阻止効果の違いは、波が存在する場合に顕著に現れることを確認した。そこで、潜堤の形状を容易に変更できる有限要素法(FEM)を用いて、振動流条件下での潜堤周辺の渦の形成状況について調べた。基礎式は、以下のような流れ関数に関するポアソン方程式と渦度の輸送方程式である。

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial y} = -\omega \dots \dots \dots (6)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial y} = (\nu + \nu_t) \nabla^2 \omega \dots \dots \dots (7)$$

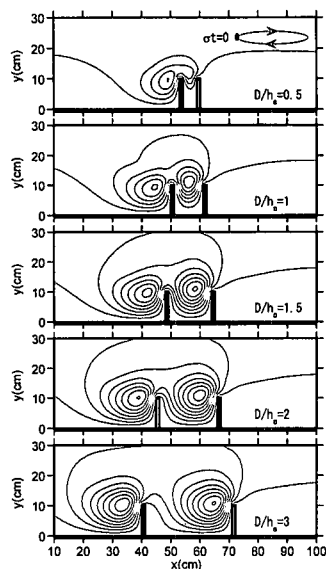
ここで、 $\psi$ は流れ関数、 $\omega$ は渦度、 $\nu$ は渦粘性係数、 $\nu_t$ は渦動粘性係数、 $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$  である。また、 $\nu_t$ は、次式のような混合距離理論で簡便に評価した。

$$\nu_t = (\kappa l)^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right| \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 $\kappa$ はカルマン定数( $=0.4$ )、 $l$ は壁面からの距離である。これらを、滝川ら(1991)にならってFEMの定式化をおこない、境界条件として、上層境界で正弦的に変動する  $\psi$  を与え、底面境界では、 $\psi = 0$  と Thom のスキームにより算定される  $\omega$  の値を与え、側方境界には鉛直一次元の乱流境界層方程式の解を与えて計算した。

本計算では、複列潜堤の配置条件を変化させた場合の潜堤周辺の渦の形成状況を比較するため、潜堤の設置間隔を変えた場合や、TT型、 $\nu\nu$ 型、 $T\nu$ 型のように潜堤の組み合わせを変えた場合の計算をおこない、潜堤周辺の渦の形成状況を比較した。

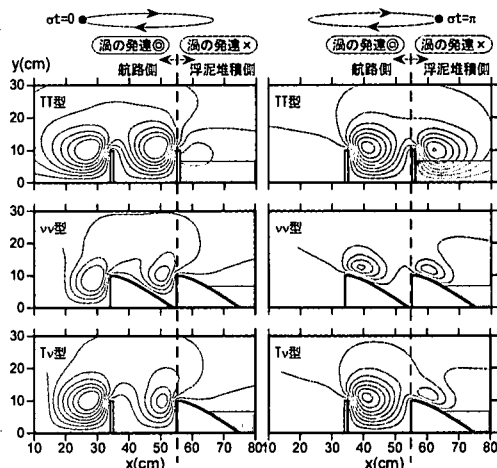
TT型潜堤について、水槽実験と同じ条件となる振動



図一10 潜堤の設置間隔に対する渦の形成状況の比較

流下において潜堤設置間隔 $D$ を変えた場合の計算結果を図一10に示す。図は、流れが左から右向きへと反転する瞬間の位相( $\sigma t=0$ )の流れ関数のコンター図であり、コンター間隔は $\Delta\psi=10\text{ cm}^2/\text{s}$ である。渦形成の特徴は、 $D/h_s$ が1.5以下の条件では、潜堤間隔が大きくなるとともに、全体的に渦の規模が大きくなっていることがわかる。また、 $D/h_s=1.5$ から3では、渦はほぼ同規模となっている。これは、渦が十分発達するためにはある程度の潜堤間隔が必要であることを示し、およそ $D/h_s>2$ で十分発達した渦が形成されるようである。

図一11は、複列潜堤の組み合わせを変えた場合の計算結果であり、 $\sigma t=0$ と $\sigma t=\pi$ の2つの位相における渦の形成状況を比較したものである。以下に、図中の破線部より右に浮泥が堆積していると仮定して、埋没阻止効果が高まる条件について考えてみる。実験の観察結果で浮泥の堆積側に逆 $\nu$ 型潜堤を配置した場合に航路への浮泥流入量の減少がみられたように、浮泥の堆積側(右側)では渦の発生を抑制して、浮泥の巻上げを防止する方がよい。一方、図中の破線部よりも右側では渦を積極的に発生させ破線部を越えてきた浮泥を攪拌して浮泥濃度を減少させる方が埋没防止に有利となる。これらを踏まえると、TT型潜堤では $\sigma t=\pi$ の時に破線の右側に大規模な渦が形成されるが、 $\nu\nu$ 型や $\text{T}\nu$ 型潜堤では、発生する渦の規模は小さく潜堤頂部付近にとどまっているため浮泥の巻上げが抑制できると考えられる。一方、潜堤間と航路側(破線の右側)では大規模な渦を発生させる方が有利であり、この場合はTT型と $\text{T}\nu$ 型が $\nu\nu$ 型に比べて渦の規模が大きい。紙面の都合上省略したが、流れのみ



図一11 複列潜堤周辺の渦の形成状況の比較

を作用させた場合の計算もおこなっており、その場合も、T型潜堤の方が $\nu$ 型潜堤よりも渦の発達効率が良いという結果が得られており、波・流れが共存する場を考慮すると $\text{T}\nu$ 型潜堤が最も効果的な複列潜堤の組み合わせであると考えられる。

#### 4. 結 論

埋没防止潜堤の複列設置により、潜堤上を越流する浮泥に対する渦による攪拌効果を強化することで、浮泥濃度の低下による沈降速度の減少を促し、航路内への流入浮泥量を単基設置時より低減できることが実験と数値計算により確認された。波・流れの存在下において、浮泥堆積側(上流側)では渦の発生を抑制し、航路側(下流側)では著しい渦を発生させて越流浮泥の濃度低下を促す方がよく、 $\text{T}\nu$ 型潜堤が最も埋没防止効果の高い潜堤の組み合わせであることがわかった。

謝辞：本研究は、国土交通省九州地方整備局下関技術調査事務所からの受託により実施した。ここに、研究発表するにあたり、資料を提供いただいたことに感謝する次第である。

#### 参 考 文 献

- Hidayat, Rahman・入江 功・森本剣太郎・小野信幸 (2001): アジア地域の港湾におけるシルテーション対策とフルードマッド, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1406-1410.
- 滝川 清・米村浩介・前田孝久 (1991): 砂澱形成過程における底面境界層の解析, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 1-5.
- 森本剣太郎・入江 功・小野信幸・竹内伸夫・Rahman Hidayat・箕作幸治 (2001): 種々の断面形状の潜堤構造物による航路埋没阻止機能に関する研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 556-560.