

海水導入工による港内埋没対策に関する実験的研究

中山哲厳* ・新井雅之* ・大村智宏** ・小林 学***
田村 仁**** ・灘岡和夫***** ・半沢 稔*****

港内埋没対策技術の開発を目的として海水導入工の効果について検討した。水理模型実験を行い、漁港周辺の水位変動、流速を計測するとともに、漁港周辺のビーズの挙動を計測した。その結果、漁港構造物端に発生する大規模な渦が、ビーズをトラップしながら移動することがわかった。海水導入工によって導水を行うと、漁港港奥に移動するビーズの量は大幅に減少するとともに、渦度および渦の移動経路は変化することがわかった。非線形長波方程式と非平衡性を考慮した準3次元浮遊砂輸送モデルにより、模型実験に対応した現地スケールの計算を実施した。漁港内では侵食量と侵食面積が海水導入工のない場合より増加し、海水導入工の効果を確認した。

1. はじめに

砂浜に位置する漁港では、活発な漂砂移動により航路閉塞や泊地埋没が生じて、漁港の機能に支障をきたす例は非常に多く、漁業者、漁港管理者は、その機能維持のために経済的な負担を強いられているのが現状である。漁港及びその周辺は、激浪時には碎波帯内となり、漂砂移動が激しくなるので、港内埋没を引き起こすだけでなく、周辺の海岸に大きな影響を及ぼすことになる。このような漂砂環境を踏まえた効果的な港内埋没対策技術の開発が望まれる。

港内埋没は、沿岸漂砂や岸沖漂砂が漁港によってトラップされることにより起こる。漁港水深は浅く、シケ時の浮遊砂濃度が高いので、浮遊砂の挙動が港内埋没に大きく影響する。松本ら (1993)、中山ら (1994) は、千葉県飯岡漁港において現地調査を行い、サーフビートによって港口部付近で発生した水平大規模渦に浮遊砂がトラップされ、この渦が港内へと輸送されることにより港内埋没が生じることを指摘している。このようなことから、高濃度浮遊砂の港内への移流・拡散・沈降過程を適切に捉えることが重要である。

本研究では、浮遊砂制御による港内埋没対策技術の開発を目的に、海水導入工 (以下、導水工という) を用いた大規模水平渦の制御について検討する。漁港泊地内に導水して港内で流れを発生させ、外港港口部に常に流出の状態とすることで、浮遊砂の港内への侵入を抑制することである。このため水理模型実験、数値計算により、導水工の有無の場合を比較検討し、導水工の浮遊砂抑制効果を検討した。

2. 実験方法

水理模型実験はピストン型不規則波造波機を有する平面水槽 (幅10 m × 長さ35 m × 深さ0.8 m) で行った。図-1に示すように、1/20勾配地形に導水工を有するモデル漁港を設置して固定床とした。この漁港形状は、あらかじめビーズ粒子 (比重1.04, 直径1.5 mm, 長さ2.25 mm) を用いた予備実験によって、港内にビーズが入りにくい港形として決定した。また、導水工には山本ら (1987) によって開発された潜堤方式を用いた。潜堤の諸元は、法勾配1/2、天端幅20 cm、潜堤長37.5 cm、遊水部幅17.5 cm、導水口の直径3.5 cmである。導水量の効果を比較できるようにあらかじめ2基分設置してある。潜堤天端は静水面と一致させており、導水工の沖側から港内へビーズが侵入しないように1.2 mm × 1.2 mmの網を遊水部の上部全面に取り付けた。実験波は、修正 Bretschneider・光易型スペクトルの1方向不規則波 (有義波高9.0 cm, 有義周期1.58 s) とした。ここでの模型縮尺は1/40を想定している。

計測には容量式波高計、電磁流速計を用いて、港内の水位変動及び平面流速を0.5 m × 0.5 m メッシュ毎に計測した。また、漁港内外の流況や渦の挙動を可視化して調べ

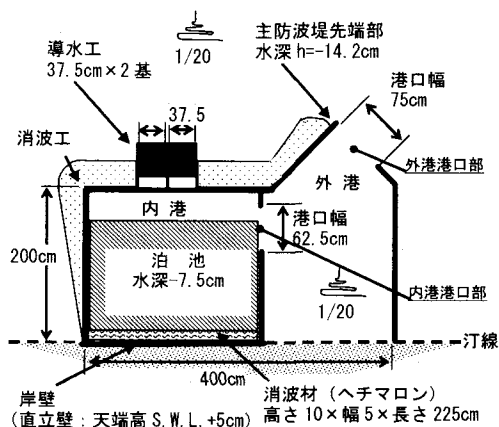


図-1 水理模型実験で用いたモデル漁港

* 正会員 工修 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所
** 正会員 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所
*** 国際気象海洋棟
**** 正会員 博(工) 日本学術振興会 特別研究員
***** フェロー 工博 東京工業大学大学院教授情報理工学研究科
情報環境学専攻
***** 正会員 工修 ㈱テトラ テトラ総合技術研究所

るため、ビーズを用いた。造波開始2分後にビーズを図-2に示す外港港口部の港外側及び港内側と外港部中央に投入してビデオ撮影した。また、投入30分後の漁港内外のビーズ量を図中に示す領域ごとに採取し、計量した。さらに、港内における流入量と流出量のバランスを検討するため、港内側の導水口と内港港口部及び外港港口部における流速の計測を行い、流量の算定を行った。各港口部の流速の計測位置は、横断方向に港口部両側の防波堤先端部から5cmの2点と港口部中央の合計3点であり、鉛直方向には静水面以下の上層と底層を計測した。このとき、各港口部の内外両側で水位変動も同時に計測した。

3. 実験結果及び考察

(1) 導水工の効果

まず、導水工の導水性能を把握するため、港内側の導水口における流速を計測し、導水量を算定した。導水工1基あたりの導水量が約 $500 \text{ cm}^3/\text{s}$ であった。また、導水工2基とすると、1基あたりの導水量の2倍に相当する約 $1,000 \text{ cm}^3/\text{s}$ の導水量となることがわかった。導水工が複数であっても、基数が少なければ、1基あたりの導水性能は変化しないものと考えられる。

図-3はビーズ投入から30分後のビーズの残留量をA～Dの領域毎(図-2参照)に示したものである。内港部である領域Cにおいて、導水量の増加に伴ってビーズ残留量が減少していることがわかる。導水量 $1,000 \text{ cm}^3/\text{s}$ の場合と導水量がない場合とを比較すると、領域Cにおけるビーズの割合が45%に減少する結果となっている。このことから、内港部への導水が浮遊砂による港内埋没対策として有効であることが予想できる。

(2) 漁港内への流入・流出量

導水量と内港港口部及び外港港口部での流出量のバランスについて検討を行った。特に外港港口部では、波浪が大きく、碎波状態となっているため、波による打ち込み量が大きく影響しているものと考えられる。

図-4は、導水量と内港港口部及び外港港口部での流出量の関係を示したものである。図より導水量が増加すると港口からの流出も増加することがわかる。導水量と内港港口部からの流出量はほぼ同じ流量であり、バランスしている。ところが、外港港口部からの流出量は、導水量の約3倍となっている。通常、流入量と流出量は等しいはずであるから、内港港口部からの流出に加え、外港への流入がどこからかあるはずである。先に述べたように波浪による打ち込みが大きく、流速計測可能なトラフレベル(静水面から水面変動の最下層の平均値)以下では、この打ち込み量にバランスした沖向きの流速となると考えられる。仲座ら(1995)によると碎波帯内では、ほぼトラフレベル以上の水位では平均的に岸向きの流れが

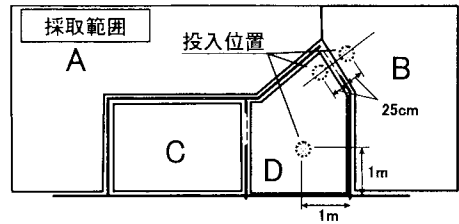


図-2 ビーズ採取範囲及び投入位置

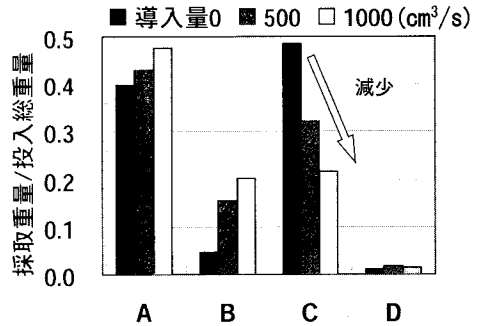


図-3 ビーズ残留量

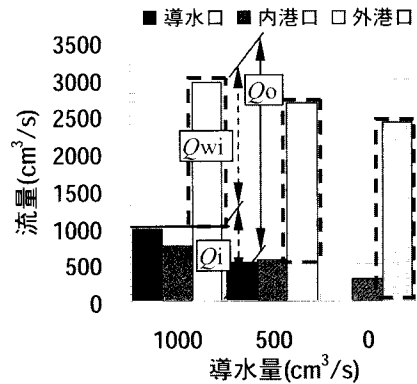


図-4 導水量及び流出量

生じていること、その流量を補償するようにトラフレベル以下で戻り流れが生じることを明らかにしている。このことから、外港港口部での流出量の過剰分は、戻り流れによるものと推測される。外港港口部の水面変動から港内への波による流入量を推定し(侵入する波は長波と仮定した)、実験で計測された Q_{wi} (総流出量から導水量を差し引いた流量)を比較した。やはり、両者はほぼ同程度の値であり、 Q_{wi} は戻り流れに相当するといえる。

外港港口部の平均流速の鉛直分布は、上層と底層ではほぼ一様であった。横断方向の平均流は、中央で $0 \sim 2 \text{ cm/s}$ 、主防波堤近傍では $7 \sim 10 \text{ cm/s}$ と中央に比べ早くなっていた。主防波堤沿いの強い流れはビーズによる目視観測からも確認された。

要約すると波による港内への流入量は、外港港口部の水位変動からほぼ推定できることがわかった。そして、

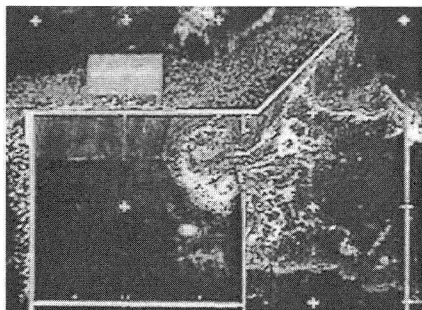


写真-1 渦によるピーズの輸送

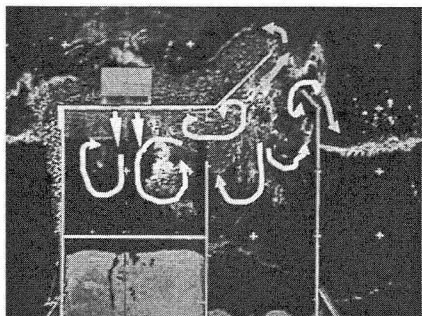


写真-2 漁港内の流況図

この量は導水量と比較して圧倒的に大きいことがわかった。流入量に含まれる浮遊砂量が港内埋没に大きく影響するのは明らかである。しかしながら、後に述べる数値計算では、この点については考慮していない。今後、この効果を取り入れる必要があるものと考え。

(3) 渦の挙動

これまでの研究（松本ら、1993；中山ら、1994；田村ら、2004）から、防波堤先端部に発生する渦による浮遊砂輸送の重要性が指摘されている。この浮遊砂輸送を把握するため、ピーズによる港内の流況観測を行った。

写真-1にその例を示す。写真から、内港港口部の防波堤の先端部に大規模な1対の渦があり、ピーズが渦に取り込まれているのがわかる。この後、渦は内港港口部から離れるように移動し、ビデオ観察では5～16s程度までその存在を確認できた。このことから、渦の寿命はかなり長いことが推定できる。また、渦のスケールは内港港口部の開口幅程度とかなり大きいものも存在する。

次に、写真-2に漁港内の流況とピーズの挙動を矢印で示す。ピーズの挙動は以下の通りである。外港側では侵入波浪によるサーフビート及び海浜流により内港港口部周辺に輸送される。内港港口部では、サーフビートやそれに伴い発生する渦により内港へ輸送され、内港で生じている平均的な循環流に捕捉される。内港で生じている循環流に捕捉されたピーズは、ほとんど港外へ出て行くことはない。内港の循環流に捕捉されなかったピーズは、内港港口部周辺で発生する渦に取り込まれ、主防波

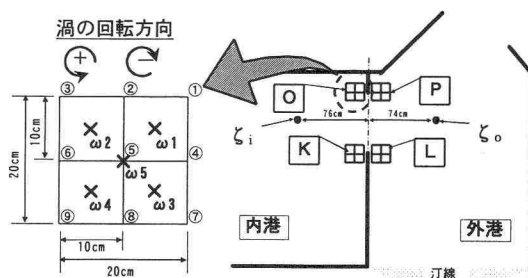


図-5 流速計測位置

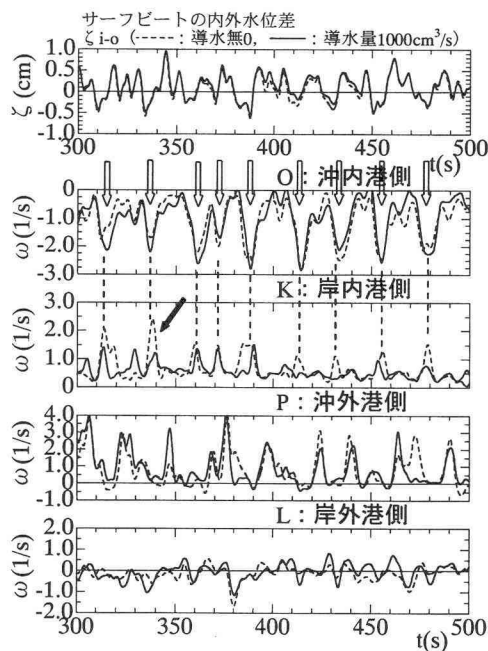


図-6 サーフビートの変動と長周期成分流速の渦度

堤沿いに港外に出て行くものと外港での海浜流に捕捉され再び内港港口部に向かうものがある。

内港港口部両側に生じる渦の特性を捉えるために、図-5に示すK、O、P、Lの4地点で流速及び水面変動の計測を行った(計測点間隔10cm, 計測点数9点)。ここで、 ζ 及び ω はサーフビートの水位変動及び渦度(図中 ω_5)である。

図-6に、導水工がある場合とない場合で、計測された内港と外港の水位差と各点での渦度の変化を示す。図中の最上段が内港と外港の水位差で、それ以下の図が渦度である。渦度の経時変化図に示した白抜き矢印の箇所では、内港港口部内側のK地点・O地点で、ほぼ同時に逆向きの渦が発生していることが伺える。外港側では、P地点の渦度がL地点に比べかなり大きくなっている。これは、外港においては主流が主防波堤沿いであるため、生じたものと推察される。

導水の有無による比較では、黒矢印に示される箇所に

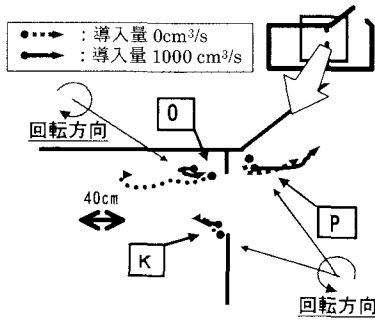


図-7 渦の移動経路の違い

顕著な差が見られる。K地点では、導水がある場合、全体的に渦度が減少している。ビデオ観察によると、K地点の渦は、主に内港側へピーズを輸送している。導水によりK地点で発生する渦が弱まり、結果的に港内へのピーズの侵入を減少させたものと考えられる。なお、導水は水位には大きな影響を与えない。

図-7には、ビデオ映像から読み取った導水の有無による渦の移動経路の違いを示す。点線が導水のない場合、実線が導水のある場合である。導水のない場合、O地点で発生した渦は内港の奥まで侵入しているのに対し、導水のある場合は、ない場合の移動距離の1/3程度までしか内港側へ侵入していない。外港側では、導水のある場合の方が沖側へ渦の移動が大きい。このように、導水により渦の移動経路が変化することがわかった。

4. サーフビートによる浮遊砂輸送過程のモデル化

水理実験からサーフビートに伴う流れによって防波堤の端部で強い渦が発生し、これが移動することが観察された。また、ピーズは主としてサーフビートに伴う流れや渦により移動することがわかった。そこでここでは、サーフビートに起因する流れ及び浮遊砂輸送について数値計算により検討する。なお、計算は現地スケールで行っている。サーフビートについては、非線形長波方程式を用いて計算した。浮遊砂輸送はその3次元性及び非平衡性を考慮した田村ら(2004)の準3次元浮遊砂輸送モデルを用いた。浮遊砂濃度の成分数は、田村ら(2004)と同じ3成分とした。沈降速度はRubey式とし、pick-up rateはNielsen(1992)が用いた下記の実験式とした。

$$P = 0.0003 \left(\frac{\phi - \phi_c}{\phi_c} \right)^{1.5} \frac{(s_s - 1)^{0.6} g^{0.6} d^{0.8}}{\nu^{0.2}} ; \phi > \phi_c$$

$$P = 0 ; \phi < \phi_c$$

(1)

$$\phi = \frac{C_f \rho_b^2}{(s_s - 1) g d} \quad (2)$$

$$C_f = \frac{n^2 g}{(h + \eta)^{1/3}} \quad (3)$$

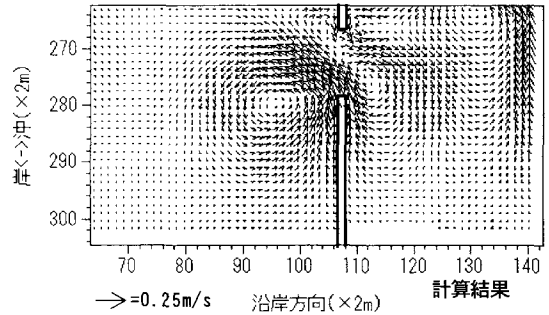
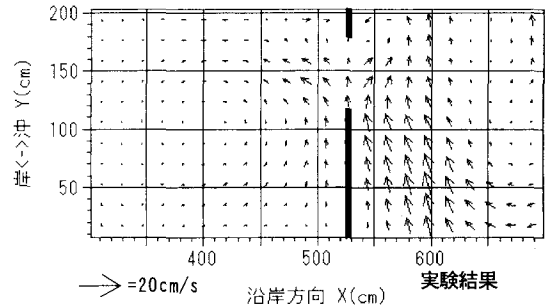


図-8 港内の平均流速

ここに P : pick-up rate (m/s), ϕ : シールズ数, ϕ_c : 限界シールズ数 (0.05), s_s : 底質の比重 (2.65), g : 重力加速度 (m/s^2), ν : 動粘性係数 (m^2/s), d : 粒径 (m, $0.0002 \text{ m} = 0.2 \text{ mm}$), n : 粗度係数 (0.02), u_b : 底面流速 (m/s), h : 水深 (m), η : 水位変動 (m) である。

実験で計測されたサーフビートを造波し (水深 20 m), これによって生じる流れにより巻き上げられ、移流・拡散・沈降する浮遊砂の移動過程を計算した。こうして、浮遊砂の堆積量を算定した。計算ケースは、①導水工無し、②導水工1基、③導水工2基の3ケースである。導水工1基あたりの導水量は、実験により求められた $500 \text{ cm}^3/\text{s}$ を現地換算し、 $5.1 \text{ m}^3/\text{s}$ とした。サーフビートは、水理実験結果を現地換算して用いることとした。サーフビートの周期は 75 s、波高は 0.19 m (水深 20 m) であり、造波時間は 25 波分 (32 分) である。拡散係数は、垂直、水平ともに $0.05 \text{ m}^2/\text{s}$ と一定にした。

導水工無しの場合の漁港周辺での平均流速ベクトルを図-8に示す。実験結果と比較すると、①流速は計算値が小さめであること、②内港港口部外側で、実験では冲向きの流れが卓越しているが、計算では循環流を形成していることに相違が見られる。しかしながら、内港側では流れの分布はほぼ一致している。外港側では、波浪が侵入していること及び1/20勾配の海浜となっていることにより、海浜流の影響が現れているものと考えられる。さらに計算では、2 m 以下の水深の浅い領域は、すべて 2 m としていることも影響している可能性がある。しかしながら、内港側での流れは両者ほぼ一致している。

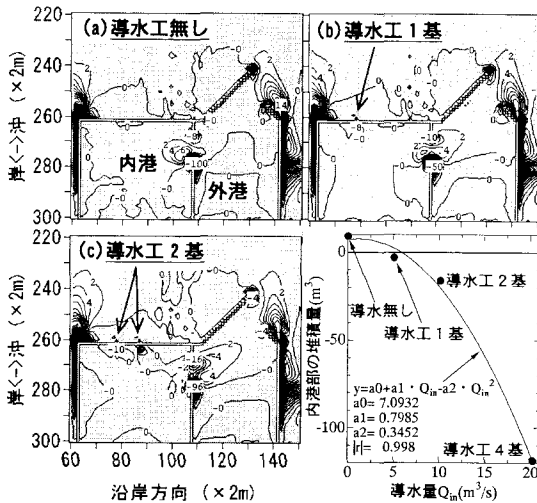


図-9 漁港及びその周辺の堆積量(単位: cm)

ことから、サーフビートによる流れが支配的であると考えられる。

地形の変化量について述べる。図-9に漁港周辺の堆積状況を示す。3ケースの共通点は、内港港口部及び外港港口部付近の両側防波堤先端部に激しい侵食が見られることである。内港港口部の現象は、類似の港形をした漁港によく見られる洗堀である。場合によっては、内港防波堤が洗堀により、傾いてしまう場合もある。このような洗堀現象は、従来の3次元海浜変形モデルでは、計算出来ない。導水工無し(a)の場合では内港港口部に堆積が見られるのに対し、導水工1基(b)、2基(c)ともに堆積領域がほとんど見られない。導水により、内港部の砂が外港へ輸送されている。そのため、両者ともに外港奥側に若干の堆積領域が見られる。図-9の内港部の堆積量と導水量の関係から、内港部の堆積量は導水量の二乗にほぼ比例し、導水工1基で内港部の堆積量がほぼ0となり、2基では内港部に侵食が生じることがわかる。

導水工の効果を評価するために、導水工がある場合と無しの場合の差をとったのが、図-10である。1、2基ともに、内港及び外港港口部に侵食領域があり、外港奥では内港部からの砂輸送による堆積領域が見られる。外港奥の堆積領域では、実際には侵入波浪による巻き上げと導水による冲向きの流れにより、砂は港外側へ輸送されるものと考えられる。図に示していないが、導水による冲向きの平均流は、航路に相当する領域において、1基では数 cm/s と小さい領域が見られ、2基ではすべて 10 cm/s 以上となる。このことから、この程度の漁港規模では、導水工2基が適当であると考えられる。また、内港からの砂輸送による外港部での堆積を出来るだけ減少させるには、外港部にも導水工の設置が必要であろう。なお、本計算は、サーフビートによる浮遊砂の挙動に着目して

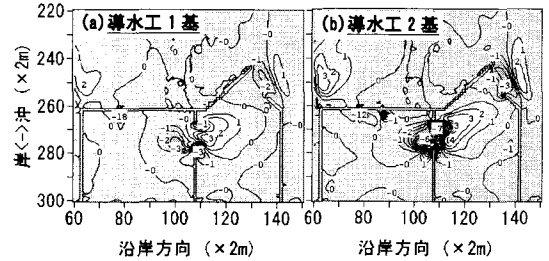


図-10 導水工有無の堆積量の差(単位: cm)

行っており、波浪による浮遊砂の発生及び先に述べた港口部での波浪の打ち込みによる浮遊砂侵入を考慮していないため、漁港内外の浮遊砂濃度は少なめと考えられる。今後、波浪、打ち込み、海浜流を考慮する必要がある。

5. ま と め

以上、まとめると以下になる。

- (1) 港口部での波浪による打ち込み量は、導水量を大きく上回ることがわかった。打ち込み量は、港口部水位変動である程度推定可能であり、この効果を今後浮遊砂輸送モデルに反映させる必要がある。
- (2) 水理模型実験から、サーフビートによって構造物先端や曲部等に発生する渦の挙動を把握し、これらがビーズの移動に重要な役割を果たしていることがわかった。このことは、浮遊砂移動に直接的に関連すると考えられる。
- (3) 渦の寿命は波浪の周期の数倍程度であること、そのスケールは水深オーダーではなく、港口部幅程度と非常に大きいものも発生していることがわかった。
- (4) 海水導入工による導水により、浮遊砂の侵入を抑制できることが、水理模型実験、数値計算からわかった。

今後の課題としては、①砂を排除し、海水のみ導入するための装置の開発、②波、海浜流、波の打ち込みによる漂砂侵入を考慮したモデルを構築する必要がある。

参 考 文 献

- 仲座栄三・河野二夫・宮里一郎・天野和宏(1995): 波の碎波変形と質量輸送量及び undertow に関する研究, 海岸工学論文集, 第24巻, pp. 71-74.
- 中山哲蔵・山本 潤・松岡道男・池田正徳・竹内聖一・灘岡和夫・八木 宏(1994): 中小港湾港口部に発生する水平大規模渦についての現地観測, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 321-325.
- 灘岡和夫・田村 仁・飯塚広泰(2004): 中小港湾港口部に発生する水平大規模渦による浮遊砂流入特性に関する数値解析-浮遊砂流入から見たハーバーパラドックス-, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 451-455.
- 松本 朗・松岡道男・中山哲蔵・山本 潤・灘岡和夫・八木 宏(1993): 中小港湾埋没機構解明に向けての長期連続現地観測の試み, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 491-495.
- 山本正昭・中泉昌光・間辺本文(1987): 港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.
- Nielsen, P. (1992): Coastal bottom boundary layers and sediment transport, World Scientific, River Edge, N.J. p.324.