

# 導入水に含まれる浮遊砂量を低減するための 海水導入工の構造に関する研究

## Study on the Structure of Water-Intake-Works to Reduce the Concentration of Suspended Sediment in Inflow

中山哲厳<sup>1</sup>・牧野弘幸<sup>2</sup>・新井雅之<sup>3</sup>・小林 学<sup>4</sup>・佐藤勝弘<sup>5</sup>

Akiyoshi NAKAYAMA, Hiroyuki MAKINO, Masayuki ARAI,  
Manabu KOBAYASHI and Katsuhiko SATO

This study examined the structure of Water-Intake-Works, which can control the inflow of suspended sediment to the inside the fishing port without reducing the amount of introduced water. A section experiment on two dimensions and a numerical calculation were executed in this study. As a result, it is confirmed that reducing the suspended load and controlling the vortex generated in water chamber could reduce the inflow of the suspended sediment to the inside the fishing port. The results also showed that there were several effective methods to reduce the suspended sediment in inflow as following: 1) to enlarge the size of the submerged mound and water chamber, 2) to install the rejection sand entrance, 3) to install the partition wall in water chamber, 4) to make training mouth upward.

### 1. はじめに

砂浜に位置する漁港において問題とされることが多い港内埋没は、主としてサーフビートにより港口部周辺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って生じることが松本ら(1993)、中山ら(1994)に指摘されている。この埋没機構を踏まえ、中山ら(2005, 2006)は、平面水理模型実験および数値計算により港内埋没対策工法の検討を実施し、海水導入工により港奥に海水を導入し、港口部を流出傾向とすることで港内への砂の侵入・堆積を抑制できることを明らかとした。この評価の前提条件は、導入水に多量の砂が混入していないことであり、通常の海水導入工ではその点で十分でないことが推察され、導入水に含まれる浮遊砂濃度を極力少なくすることが不可欠となる。中山ら(2006)の研究においても砂の侵入を低減できる海水導入工の検討までは為されていない。このことから、本研究では導水量を確保しながら土砂の港内への侵入を抑制・阻止できる海水導入工の構造を検討することを目的とし、大縮尺の2次元断面実験により海水導入工構造の評価を行った。また、数値計算により現地スケールにおいて有効となる海水導入工の構造について評価した。

### 2. 水理模型実験による海水導入工構造の評価

#### (1) 実験概要

模型実験での検討は縮尺1/5の2次元断面実験により

行った。海水導入工形式は潜堤式とし、その基本断面形状を図-1に示す。また、実験ケースを表-1に示す。海水導入工の沖側に中央粒径0.17mmの砂を敷設し、波高50cm, 周期4s程度(現地換算2.5m, 9s)の規則波を作用させ、海水導入工周辺の波高, 流動を計測した。また、ケース毎に港内側の堆砂量を計測し、波浪作用時間の導水管における流速から算出した導水量を用いて、導入水中の平均浮遊砂濃度を算定した。

#### (2) 浮遊砂の港内侵入状況

模型実験では、潜堤前面の砂は波動流に伴って底面近くを往復移動しながら、乱れ等の影響により波状地形が形成され、砂漣の峰付近において底質が大きく巻き上がる状況が確認された。巻き上げられた砂は潜堤による強制的な碎波に伴う岸向きの流れにより遊水部に運ばれ、一部は導水管を通過して港内に流入した。また、装置停止後には遊水部に堆砂が認められた。遊水部では水の流入に伴って渦の形成が確認でき、遊水部に沈降した砂は

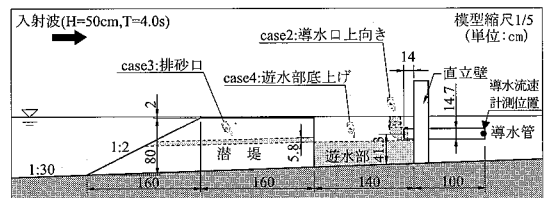


図-1 海水導入工基本形状

表-1 模型実験ケース

case no.	形状
case1	基本形状
case2	case1 + 導水口上向き
case3	case2 + 排砂口
case4	case3 + 遊水部底上げ

1	正会員	工修	(独法)水産総合研究センター水産工学研究所
2		工修	(株)アルファ水工コンサルタンツ
3	正会員	工修	(独法)水産総合研究センター水産工学研究所
4			国際気象海洋(株)
5	正会員	工修	(株)アルファ水工コンサルタンツ

渦によって再び巻き上げられた。また、浮遊砂は渦をはじめとする遊水部の大きな乱れにより長時間浮遊することになり、これが港内へ侵入する浮遊砂量を増加させているものと考えられる。

以上より、港内への浮遊砂の流入は遊水部に発生する渦の規模あるいは強さに大きく影響すること、遊水部に堆積する砂が再度巻き上がることに遊水部において常に浮遊砂濃度が高い状態が続くことが推察された。したがって、浮遊砂の遊水部への流入の低減、流入した浮遊砂の排出、遊水部に発生する渦の抑制が港内への浮遊砂の流入に対して有効であると考えられた。

(3) 海水導入工構造の評価

以上を踏まえ、表-1 に示すケースを評価した。図-2 に各ケースの導水流速 (図-1 の計測地点における造波開始後 35 s ~ 75 s の 40 s 間の平均値) と港内側での堆積量から算定した導入水中の平均浮遊砂濃度の比較を示す。

浮遊砂は底面に近いほど濃度が高いと考えられたため、導水管を上向きにしたケース (case2) を行った結果、導水管の屈曲により導水流速が 3 割程度低減したものの、導入水中の浮遊砂濃度は case1 の 7 割程度に抑えられた。

次に、導水管上向きに加え、遊水部での堆砂や再巻き上げの対策として、潜堤に排砂口を設け、沖に排砂する形状を評価した (case3)。この結果、遊水部での水位上昇量が case1, 2 に比べて小さくなり、それに伴い導水流速も case1 の 1/2 程度となったが、平均浮遊砂濃度は case1 の 6 割弱まで抑えられた。遊水部に流入した砂が排砂口から排出されることで遊水部の浮遊砂量が減少したためと考えられる。なお、case1, 2 では装置停止後に遊水部で堆砂が認められたが、case3 では殆ど堆砂しておらず、遊水部への堆砂に対して有効であることが確認された。

さらに、遊水部に発生する渦の規模の縮小を図り、case3 の遊水部を底上げたケース (case4) について評価したが、この場合は、浮遊砂濃度は底上げしない場合よりも大きくなった。これは、遊水部が浅いことから、底面に作用する流れおよび乱れが大きくなり、砂は常に浮遊する状態となったためと考えられる。これより、遊水部は深い方が効果的であることが推察された。

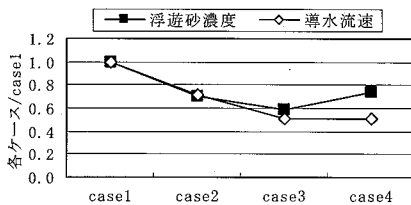


図-2 導水流速および浮遊砂濃度の比較

以上までの検討により、導水管を上向きにすること、潜堤に排砂口を設けることが港内への浮遊砂の流入に対して有効であるという結果が得られた。

3. 数値計算による海水導入工構造の評価

模型実験の結果、遊水部に浮遊砂を流入させないこと、遊水部での渦を抑制することが重要であることが推察され、潜堤規模や遊水部幅等が砂の流入に大きく影響するものと考えられた。そこで、構造の変更が容易である数値計算により海水導入工の構造を検討した。

まず、数値波動水路について、浮遊砂の巻き上げ、移流拡散、沈降の輸送過程を計算できるように改良した。次に、水理模型実験と同条件下で計算を行い、水理量ならびに浮遊砂濃度の比較により数値計算の妥当性を確認した。さらに、模型実験結果を踏まえて効果的な構造を現地スケールにて高波浪を対象に検討した。

(1) 数値計算手法の概要

数値計算は沿岸開発技術研究センター (2001) により提供されている数値波動水路「CADMAS-SURF」を改良し、浮遊砂の輸送過程を計算できるようにした。浮遊砂の移流拡散式として次式を使用した。

$$\frac{\partial \lambda_v C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_x u C - \lambda_x A_H \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_z (w - w_s) C - \lambda_z A_z \frac{\partial C}{\partial z}) = 0 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、C は浮遊砂濃度、u, w, w\_s は流体流速、x, z 成分と浮遊砂の沈降速度、A\_H, A\_z は浮遊砂の水平、鉛直拡散係数である。また、λ\_x, λ\_z, λ\_v はそれぞれ透過構造物に対する流体の面積率成分、体積率 (= 空隙率、流体占有率) を示し、本検討では浮遊砂による体積率変化は考慮せず、海底地形・構造物は全て不透過セルで表現したことから、これらの係数の値は全て 1 となる。

水面及び底面の境界条件は面を横切る浮遊砂の輸送はないものとして、式(2)、式(3)に示すとおり設定した。

$$[\text{水面}] (w - w_s) C - A_z \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

$$[\text{底面}] (w - w_s) C - A_z \frac{\partial C}{\partial z} = P - D \dots \dots \dots (3)$$

P, D は砂の巻き上げ量と沈降量 (= w\_s C\_bed, C\_bed : 底面の浮遊砂濃度) である。砂の巻き上げ量は Nielsen (1992) 式により算定しているが、水平方向の各格子に設定された砂層厚により巻き上げ量を制限でき、潜堤から岸側の初期砂層厚を 0 とすることで、堆積した分のみ巻き上がるようにしている。沈降速度 w\_s は Rubey の式を用いた。

計算は表-2 に示す条件下で実施した。なお、計算は完全な 2 次元であるため、模型実験との比較に際しては、導水口部分の断面積ができるだけ近くなるように構造物

表-2 数値計算条件

	模型スケール(1/5)	現地スケール
計算目的	模型実験との比較	効果的な構造の検討
波 浪	$H=50\text{ cm}$ , $T=4.0\text{ s}$	$H=4.0\text{ m}$ , $T=10.0\text{ s}$
格子間隔*	$dx=2\sim 8\text{ cm}$ $dz=2\sim 4\text{ cm}$	$dx=0.1\sim 0.4\text{ m}$ $dz=0.1\sim 0.2\text{ m}$
浮遊砂の拡散係数	水平: $0.05\text{ m}^2/\text{s}$ 鉛直: $0.02\text{ m}^2/\text{s}$	水平: $0.05\text{ m}^2/\text{s}$ 鉛直: $0.02\text{ m}^2/\text{s}$
底 質	一様粒径: $0.17\text{ mm}$ 比 重: $2.65$	一様粒径: $0.2\text{ mm}$ 比 重: $2.65$

\*遊水部付近で最も小さくなるように不等間隔格子を設定

格子を設定した。また、計算は規則波 15 波分行い、導水流速ならびに浮遊砂濃度は導水管の港内側端部(位置は図-1 参照)における後半の 10 波分の平均値を採用した。

(2) 計算モデルの妥当性

数値計算の妥当性を検証するため、水理模型実験と同条件の計算(模型スケール: 縮尺 1/5)を実施し、海水導入工周辺の波高、水位上昇量、平均導水流速ならびに平均浮遊砂濃度について模型実験結果と比較した。計算に多大な時間を要することから、造波地点から潜堤までの距離を実験よりも小さくしているため、統計開始時間が模型実験と異なるが、いずれも流動が概ね定常となつてから統計を開始している。

海水導入工周辺における波高、水位上昇量は模型実験に近い値を示した。また、図-3 に示す導水流速ならびに導入水中の浮遊砂濃度の算定結果から、流速、浮遊砂濃度ともに模型実験結果と近い値を示し、数値計算は概ね妥当であると判断できる。

図-4 に数値計算による潜堤周辺の平均流及び平均浮遊砂濃度の断面分布を示す。遊水部での流動は渦が支配的であることが平均流から推察できる。遊水部の底層の一部は中層に比べ浮遊砂濃度が大きく、渦による再巻き上げを示唆している。導水口付近では表層に近いほど浮遊砂濃度が小さく、模型実験で導水口を上向きにした場合の結果を裏付けている。また、潜堤上は沖側ほど浮遊砂濃度が高いという結果が得られた。なお、図-4 には次項の CASE4-4 ~ 4-6 の仕切り壁の例も併せて示した。

(3) 海水導入工構造の評価

港内に浮遊砂を侵入させないためには、まず遊水部に浮遊砂が流入しないような構造とすることが求められる。また、水理模型実験および数値計算により、遊水部に形成される渦が導入水中の浮遊砂濃度に影響を与えていることが推察されたことから、遊水部での渦を抑制することが有効であることが予想される。したがって、主として、潜堤を超えて遊水部に土砂が流入し難い構造、あるいは渦の規模、強さを抑制する構造について、現地スケールで検討した。現地スケールでの計算ケースは表-3 の通りであり、港内埋没が高波浪時に発生することを勘

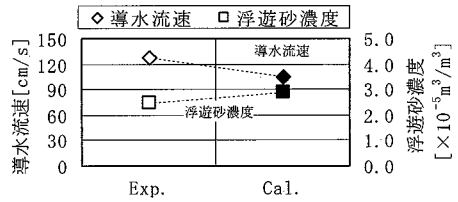


図-3 模型実験と数値計算の比較

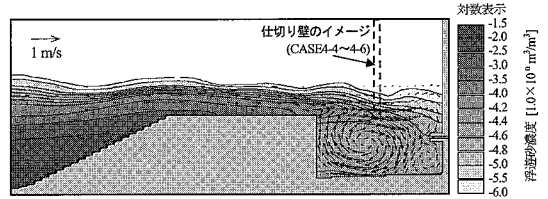


図-4 数値計算による潜堤周辺の平均流と浮遊砂濃度

表-3 数値計算ケース

case no.	形 状
CASE1	基本形状( $B_{FH}=8\text{ m}$ , $FH=-0.1\text{ m}$ , $B_{yu}=7\text{ m}$ , $h_{yu}=3.3\text{ m}$ )
CASE2-1	$B_{FH}=20\text{ m}$ , $FH=-0.1\text{ m}$ , 遊水部は CASE1 と同様
CASE2-2	$B_{FH}=20\text{ m}$ , $FH=+0.2\text{ m}$ , 遊水部は CASE1 と同様
CASE2-3	$B_{FH}=20\text{ m}$ , $FH=+0.5\text{ m}$ , 遊水部は CASE1 と同様
CASE3-1	$B_{yu}=20\text{ m}$ , $h_{yu}=1.3\text{ m}$ , 潜堤は CASE1 と同様
CASE3-2	$B_{yu}=20\text{ m}$ , $h_{yu}=2.3\text{ m}$ , 潜堤は CASE1 と同様
CASE3-3	$B_{yu}=20\text{ m}$ , $h_{yu}=3.3\text{ m}$ , 潜堤は CASE1 と同様
CASE4-1	$B_{FH}=16\text{ m}$ , $FH=+0.5\text{ m}$ , $B_{yu}=12\text{ m}$ , $h_{yu}=3.3\text{ m}$
CASE4-2	CASE4-1+ 排砂口(模型実験 case3 をスケールアップ)
CASE4-3	CASE4-1+ 排砂口(CASE4-2 の 1/2 規模)
CASE4-4	CASE4-1+ 仕切り壁(直立壁から 8 m, 水面まで)
CASE4-5	CASE4-1+ 仕切り壁( $\approx 4\text{ m}$ , 水面まで)
CASE4-6	CASE4-1+ 仕切り壁( $\approx 4\text{ m}$ , 水面下 1 m まで)
CASE4-7	CASE4-1+ 導水口上向き

\*  $B_{FH}$ : 潜堤天端幅,  $FH$ : 潜堤天端高(静水面基準),  
 $B_{yu}$ : 遊水部幅,  $h_{yu}$ : 遊水部静水深

案して、模型実験よりも高波浪条件で検討を行った。

a) 潜堤規模

模型スケールでの数値計算結果等から、遊水部に流入する浮遊砂量は潜堤ならびに遊水部の規模に影響を受けるものと推察される。また、潜堤が大きくなると波浪減衰効果も高くなるため、遊水部の渦が弱められることが予想される。以上を勘案して、CASE2-1 ~ 2-3 について計算し、効果的な潜堤規模の目安を検討した。

図-5 に各ケースの導入水中の浮遊砂濃度および導水流速を CASE1 の結果で基準化したものを示す。いずれのケースも CASE1 に比べて浮遊砂濃度が 2 割程度まで低減しており、潜堤天端幅を大きくすることが港内への浮遊砂侵入に対して有効であることがわかる。また、天端高が高い方が導入水中の浮遊砂濃度は小さくなった。

図-6 に潜堤天端先端 ( $D_{FH}/B_{FH}=0.0$ ,  $D_{FH}$ : 潜堤天端先端からの距離,  $B_{FH}$ : 潜堤天端幅 (=20 m)) にお

ける天端上の浮遊砂濃度 (左) および浮遊砂フラックス (右) の鉛直分布を示す。図の縦軸は基本潜堤天端高 (水面下 0.1m) 上の高さ  $h_{FH}$  を入射波高  $H_{in}$  で無次元化したものである。浮遊砂濃度は右側に岸向き流れ時 ( $U > 0$ )、左側に冲向き流れ時 ( $U < 0$ ) の濃度を示しており、これより、天端付近で浮遊砂濃度が高く、天端高によらず浮遊砂濃度は同様の鉛直分布を示す。また、天端高が低いほど岸向きの浮遊砂フラックスが大きいことから、天端高を高くすることで遊水部への浮遊砂流入量は減少すると考えられる。

図-7 に、効果の高い CASE2-3 について、図-6 の浮遊砂濃度を鉛直方向に積分し、 $U > 0$  時の潜堤天端先端での値により基準化した値としたものの分布を示す。これより、岸側ほど小さい値を示す結果となっている。遊水部の条件により結果は異なると考えられるが、 $D_{FH}/B_{FH} = 0.8$  付近で天端先端の 1 割程度まで低減しており、遊水部への浮遊砂の流入も少なくなるものと推察される。

**b) 遊水部条件**

次に、模型実験等によって遊水部の渦が浮遊砂の港内侵入に影響を及ぼすと推察されたため、CASE3-1 ~

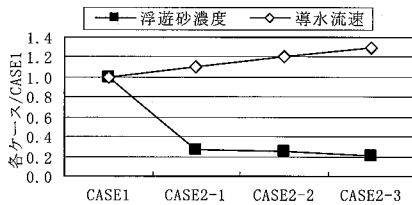


図-5 各ケースの導入水中の浮遊砂濃度及び導水流速

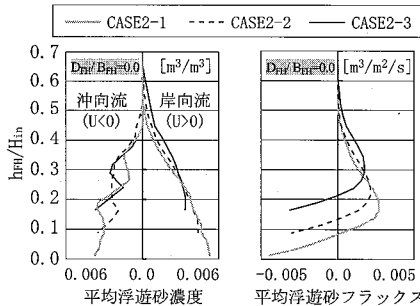


図-6 潜堤上の浮遊砂濃度と浮遊砂フラックスの鉛直分布

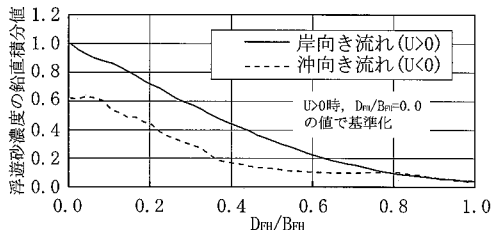


図-7 潜堤上の平均浮遊砂濃度の鉛直積分値 (CASE2-3)

3-3 を実施して遊水部幅の影響を検討した。

図-8 に各ケースの導入水中の浮遊砂濃度及び導水流速を CASE1 の結果で基準化したものを示す。CASE3-1 では導入水中の浮遊砂濃度が CASE1 の 4 割程度、CASE3-2, CASE3-3 については 2 割程度まで低減しているため、遊水部を広く、かつ深くすることが港内への浮遊砂侵入に対して有効であると判断できる。図-9 に遊水部での平均流および平均浮遊砂濃度の断面分布と遊水部内の浮遊砂濃度の鉛直積分値を示す。グラフの横軸は (遊水部沖端からの距離  $D_{yu}$ ) / (遊水部幅  $B_{yu}$  (=20m)) により水平位置を示し、積分した浮遊砂濃度は遊水部先端の値により基準化している。この結果から、遊水部での平均的な渦は直立壁に近い位置で発生することがわかる。ただし、遊水部への波の打ち込み時には  $D_{yu}/B_{yu} = 0.0 \sim 0.6$  程度にも渦が形成されることが多く、浮遊砂が渦に捕捉されることにより濃度もその付近で高い。  $D_{yu}/B_{yu} > 0.6$  では浮遊砂濃度の鉛直積分値の変化が緩やかとなっていることから、遊水部で平均的に発生する渦よりも打ち込み時に発生する渦の影響が大きいことがわかる。

**c) 排砂口**

以上の結果を踏まえて、効果的と考えられる施設規模である CASE4-1 について評価を行った。また、遊水部での浮遊砂濃度の低減、再巻き上げの防止を図り、潜堤に排砂口を設け、沖に排砂するケースを検討した (CASE4-2, CASE4-3)。結果を図-10 に示す。

CASE4-1 では導入水中の浮遊砂濃度が CASE1 の 3 割程度となった。また、浮遊分も含めて計算終了時に遊水部に残った砂の量に関しても 4 割程度に減少しており、

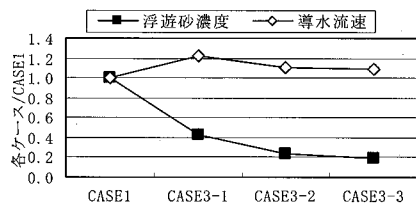


図-8 各ケースの導入水中の浮遊砂濃度及び導水流速

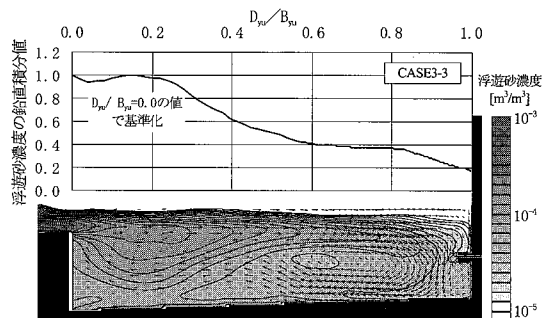


図-9 遊水部での平均流および浮遊砂濃度 (CASE3-3)

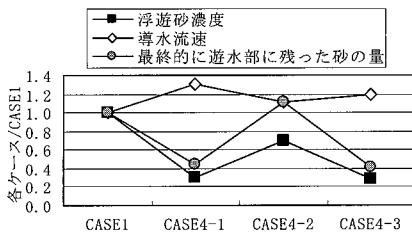


図-10 各ケースの導入水中の浮遊砂濃度・導水流速および計算終了時に遊水部に存在した全漂砂量

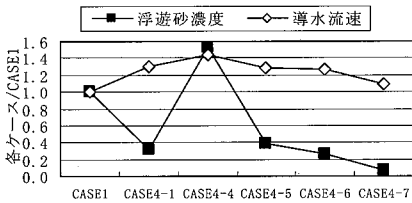


図-11 各ケースの導入水中の浮遊砂濃度及び導水流速

遊水部に砂が流入しにくい構造であることが示された。排砂口を設けた2ケースに関しては、CASE4-2はCASE4-1よりも浮遊砂濃度が大きくなる結果となったが、排砂口の規模を小さくしたCASE4-3についてはCASE4-1よりも若干小さくなる結果となった。また、遊水部の砂の量についても同様の結果となった。これは、排砂口の有無あるいは規模によって遊水部の水位低下速度が異なり、潜堤前に存在する浮遊砂濃度が高い水の遊水部への流入のしやすさに違いが生じたことが原因と考えられる。ただし、遊水部に流入した浮遊砂の中には直立壁で反射されて沖に戻されるもの、排砂口から排出されるものもあることから、潜堤・遊水部の規模や排砂口の規模及び位置のバランスが重要であると考えられる。以上より、排砂口の規模を適切に設定することで、遊水部から浮遊砂を排除することが可能となると考えられる。

**d) 仕切り壁，導水口の向き**

b) より、導水口と渦の距離が大きい場合に導入水中の浮遊砂濃度が低減したため、渦の影響が小さくなるよう、遊水部に仕切り壁を設けたケースを検討した(CASE4-4～4-6)。さらに、模型実験で効果のあった導水口上向きのケースを実施した(CASE4-7)。結果を図-11に示す。

この結果、潜堤近くに仕切り壁があるCASE4-4は、打ち込んだ水塊が仕切り壁下を通過し、その岸側で渦が形成されて砂が巻き上げられるため、導入水中の浮遊砂濃度が増加した。仕切り壁が潜堤から離れているCASE4-5、CASE4-6では仕切り壁の沖側で渦が形成されて浮遊砂が捕捉され、水面下1mまで仕切り壁としたCASE4-6ではCASE4-1よりも導入水中の浮遊砂濃度が小さくなった。したがって、仕切り壁の沖側に渦が形成される位置に、

適切な深さまで仕切り壁を設けることにより、港内への砂の流入に対して有効となるものと考えられる。

また、導水口を上向きにしたCASE4-7では、模型実験の結果と同様に導入水中の浮遊砂濃度を低減させるのに有効である結果が得られた。

**4. ま と め**

浮遊砂の港内への侵入を抑制できる海水導入工の構造に関して、水理模型実験および数値計算により検討した。その結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 模型実験等から、遊水部への浮遊砂の流入を低減させること、流入した浮遊砂を排出すること、遊水部に発生する渦を抑制することが有効であると推察された。
- (2) 模型スケールでの数値計算では模型実験結果と近い結果が得られ、数値計算の妥当性を示した。
- (3) 数値計算結果から、港内への浮遊砂の侵入を抑制する構造として、・潜堤規模及び遊水部規模を大きくする、・排砂口を設ける、・遊水部に仕切り壁を設ける、・導水口を上向きにする等が有効となることを示した。
- (4) 構造を改良することにより、導入水中の浮遊砂濃度を基本形状ケースの数%まで低減することができた。
- (5) 今後の課題としては、地形変化も併せて計算させることによる精度向上、混合粒径の考慮、外力や地形条件による効果の違いの評価等が挙げられる。

**謝辞**：本研究は水産基盤整備委託事業費（課題名：海水導入工を利用した港内埋没防止技術の開発）により行った。また、水理模型実験の浮遊砂濃度測定に関しては、港湾空港技術研究所の栗山善昭室長、鈴木崇之研究員にご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

**参 考 文 献**

沿岸開発技術研究センター(2001)：数値波動水路の研究・開発(CADMAS-SURF)-数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書-，沿岸開発技術ライブラリー，12，296p.

中山哲蔵・新井雅之・大村智宏・小林 学・田村 仁・灘岡和夫・半沢 稔(2005)：海水導入工による港内埋没対策に関する実験的研究，海岸工学論文集，第52巻，pp. 481-485.

中山哲蔵・牧野弘幸・新井雅之・大村智宏・小林学・田村仁・灘岡和夫・佐藤勝弘(2006)：港内埋没対策技術と地形変化予測モデルの開発，海岸工学論文集，第53巻，pp. 526-530.

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.

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.

Nielsen, P.(1992)：Coastal bottom boundary layers and sediment transport, World Scientific, River Edge, N.J., p. 324.