

# 通水路型防波堤を有する小規模港湾の 堆砂制御に関する研究

STUDY ON CONTROLLING ENTRAINMENT OF SEDIMENT  
INTO A SMALL HARBOR WITH CHANNEL-TYPE BREAKWATER

尹 晟鎭<sup>1</sup>・森田修二<sup>2</sup>・出口一郎<sup>3</sup>

Seongjin YOON, Syuuji MORITA and Ichiro DEGUCHI

<sup>1</sup>学生員 工修 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 (株)奥村組 技術本部・技術開発部 (〒108-8381 東京都港区芝5-6-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

We investigated the mechanism of the entrainment of sediment into a small harbor with channel-type breakwater through experiments in a wave basin. It was found that the significant sediment entrainment took place when the mode of oscillation in the harbor became the 1<sup>st</sup> mode. In the case where the incident wave period was shorter than the period that caused higher mode oscillation in harbor, only a little amount of sediment entrainment took place. The separated eddies from the top of sub breakwater played very important roll in the entrainment of sediment into the harbor. It is also found that the small jetty attached at the top of sub breakwater could effectively prevent the entrainment of sediment into the harbor. The opening of the channel in breakwater could also reduce the amount of entrainment of sediment at certain condition of incident wave period.

*Key Words : Entrainment of sediment into harbor, Separated eddy, Breakwater with channel, Small jetty attached to the top of sub breakwater*

## 1. まえがき

浅海域の長周期波は、海岸・港湾工学上の種々の重要な問題に関与することがよく知られている。例えば、係留船舶の長周期動揺を引き起こし、係留索の切断や荷役作業の中断を引き起こす等の被害が各地で報告されている。また、いくつかの港湾においては航路・泊地が埋没して必要な航路水深が確保できなくなり、船舶の安全かつ円滑な航行が妨げられるという問題も発生している。特に中小規模港湾は高波浪時には漂砂移動の激しい碎波帯内に位置している場合があり、港内に堆積が生ずる可能性も高くなる。港口部付近における漂砂移動は風波や海浜流などでは説明できない部分が残されている。その1つの要因として、長周期流速変動に起因して港口部の防波堤先端で形成される剥離渦による底質の巻き上げと水粒子軌道振幅の長い長周期波による港内への輸送・沈降といった機構が挙げられる<sup>1)</sup>。

港口から港内に海底砂が輸送されて生ずる港内堆

砂問題については、入射波浪と港湾・港口形状によって決定される港湾周辺の流体運動が大きく関わっている。本研究では、このような港内堆砂を制御するにあたり、①通水路型防波堤を用いることによる港内振動の変化及び、②港口条件を変えることによる剥離渦の制御という2つの方法の有効性について、実験的に検討した結果について報告するものである。

なお、通水路型防波堤の基本的な水理機能、海水交換能力等については既に発表している<sup>2) 3) 4)</sup>。

## 2. 実験の概要

### (1) 実験の目的

本研究の目的は、港湾模型を用いた水理模型実験を行なうことにより、長周期波が来襲する際に防波堤先端付近で発生する剥離渦によって発生する長周期流速成分に起因する港内への漂砂移動と堆砂機構

及びその制御方法について実験的に検討することである。

## (2) 実験装置

一連の実験は図-1に示す13m×10mの平面水槽に港湾模型を配置して行った。平面水槽は、入射角は20°であり、防波堤前面の法先から1/10の勾配を持ちその上に港湾模型を配置し、防波堤前面での反射波を低減するために消波ブロックを設置した。水深は、沖側では一様水深35cmで、港口部では20cmである。

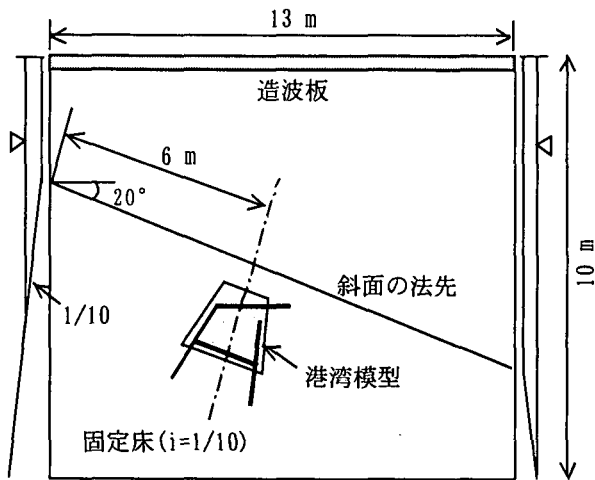


図-1 実験水槽の概要

図-2に港湾模型と計測器の配置を示す。港湾模型は1/50程度のスケールを想定している。港湾の両側面には通水路型防波堤を配置したが、本研究では著者が考案した通水路型防波堤の中で水平型のものを用いた。この通水路を開口することおよび港口形状を変えることによって、副防波堤先端で剥離渦により巻き上げられた漂砂移動への影響を検討する実験を行なった。波高測定には容量式波高計を用いて

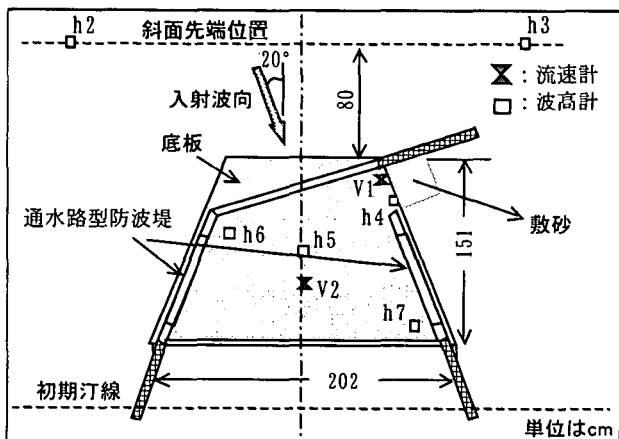


図-2 港湾模型と計測器の概要

おり、港外に3本、港口部に1本、港内に3本を配置した。港外のh1は入射波高を測定するために造波板の手前に設置した。流速測定については2成分の電磁流速計を用いており、港口部に1本、港内に1本を配置している。

図-3には、通水路型防波堤の模型を示すが、1個の防波堤模型は4つのブロックで構成され、通水路の高さは1cm間隔で5cmまで調整できるようになっている。今回の実験では、4つの通水路ブロックのうち沖側の2つの通水路(16cm×2個)を開口することにした。

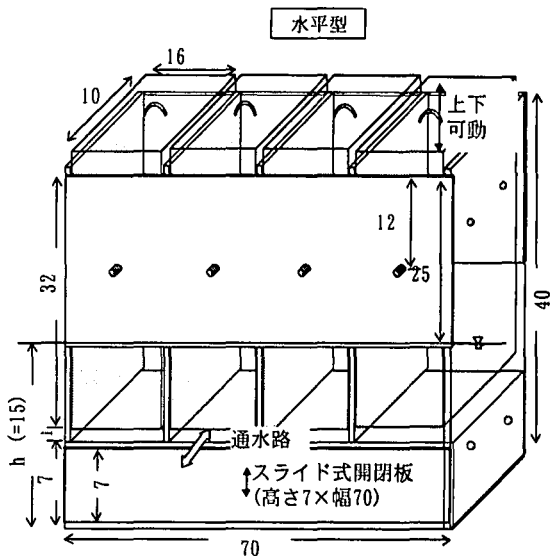


図-3 通水路型防波堤の模型

## (3) 実験の条件と手順

実験の条件としては、波の周期、港口部の形状、通水路の開閉、入射波の種類などの差異による港内堆砂および波高、流速変化について検討する。

実験に先立ち、Leeの理論<sup>5)</sup>で港内での波高分布に対する概略計算を行なった。この結果、港内振動モードは入射波の周期が3.5s以上の場合には1次、3.0s以下の場合には2次以上の高次のモードとなることがわかった。したがって、実験波はこのような港内振動のモードが堆砂に及ぼす影響を明らかにするため、周期1.5s～5.0sの範囲とした。これらの実験波のうち、港内振動モードが2次以上となる周期3.0s以下の波を短周期波、1次となる周期3.5s以上の波を長周期波と称する。また、通常は短周期波の擾乱による底質の巻き上げと長周期波による輸送(港内もち込み)というパターンが考えられるため、周期0.8sの短周期波と周期2.0s～5.0sの波を重ね合わせた2成分波(振幅比1)による実験も行なった。表-1に1成分の規則波および2成分合成波の入射波高を示す。

港湾模型の港口配置形状は図-4に示すように4タイプについて検討した。すなわち、

- ①type-1：基本形状 1
  - ②type-2：type-1に剥離渦の低減対策として副防波堤に突堤(20cm)を設置
  - ③type-3：基本形状 2（主防波堤を40cm延長）
  - ④type-4：type-3に突堤(20cm)を設置
- である。通水路型防波堤の模型は、通水路の開口高さや開口位置がブロックごとに調整できるようになっている。通水路の影響を検討するため、それぞれのタイプの港口形状に対し、通水路を開口した場合と閉口した場合の実験も行った。

表-1 入射波高

1成分波		2成分波	
T (s)	H (cm)	T (s)	H <sub>1/3</sub> (cm)
1.5	3.06		
2.0	4.42	0.8+2.0	5.13
2.5	3.94	0.8+2.5	4.21
3.0	3.81	0.8+3.0	4.29
3.5	3.91	0.8+3.5	3.99
4.0	4.34	0.8+4.0	4.15
4.5	4.84	0.8+4.5	3.93
5.0	4.07	0.8+5.0	5.20

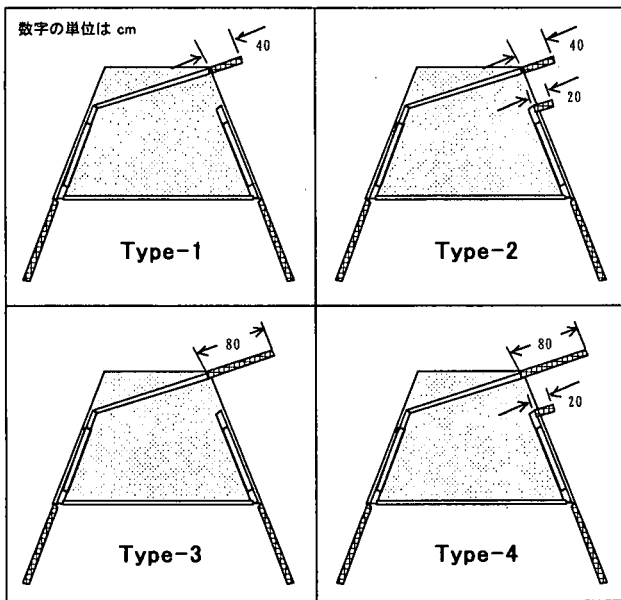


図-4 港湾模型の形状

実験の手順は次の通りである。

- ①港口部に標準砂 ( $d_{50}=0.1\text{mm}$ ) を図-2に示すように港口周辺に1cm厚さで敷く。
  - ②水槽が静穏になった状態で造波を始め、港内及び港湾周辺の波高と流速を測定する。
  - ③10分後に造波を止めて砂移動状況を撮影し、基準線から港内へ流入された砂を採取する。
- 造波時間は全てのケースにおいて10分にし、通水路型防波堤としては水平型防波堤を用いることにした。実験から採取した砂の重量は炉乾燥重量を用いている。また、港口周辺の流況は、トレーサーを投

入してその動きをビデオ解析することによって計測した。

### 3. 実験結果

#### (1) 波高

図-5に港口 ( $h_4$ ) で測定された波高を示す。横軸は波の周期であり、縦軸は、入射波高で無次元化した波高比である。ここで、 $h_4$ は、港口の1成分波の波高、 $2h_4$ は、港口の2成分合成波の波高、 $t_1$ はType-1、 $h_a$ は通水路の開口高さで、 $h_{a0}$ は閉口した場合、 $h_{a1}$ は1cm開口した場合の結果を示している。

波高の変化を見ると、主防波堤を延長した場合のType-3と4はType-1と2に比べて周期2.0sの辺りで明らかに静穏になっている。これより主防波堤の延長によって比較的短周期波は抑えられることがわかる。副防波堤に突堤を延長した場合のType-2と4は、ない場合のType-1と3に比べて差はあまり見られない。2成分合成波の場合は、有義波高を用いており、1成分波の結果と比べると、Type-3の場合はあまり変化がないが、Type-2の場合は大きくなる傾向がみられる。また、通水路の開閉による波高変化は、いずれのケースでもほとんど差が見られない。他の港内の波高計でも同様の結果であり、この程度の通水路の開口では港内の静穏性への影響は見られなかった。

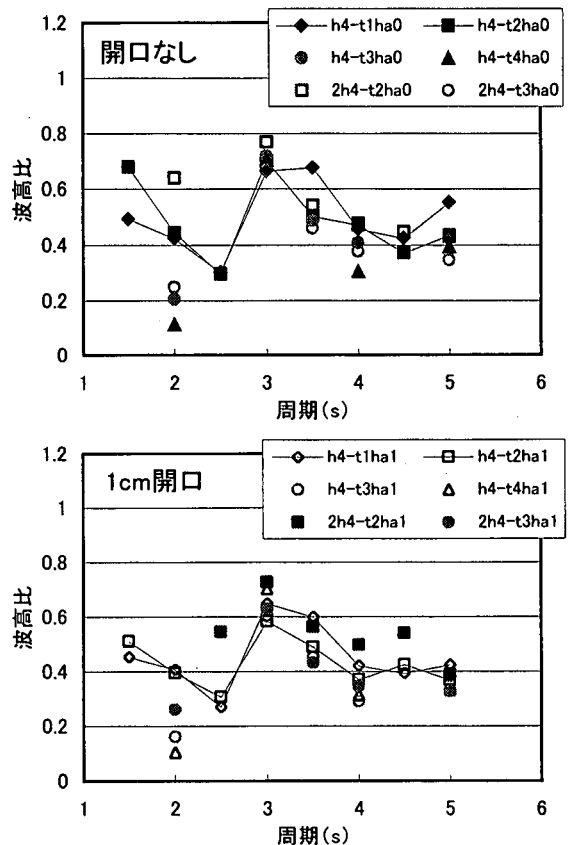


図-5 波高(港口)

## (2) 流速

図-6は港口における流速振幅を示したものである。横軸は波の周期であり、縦軸は電磁流速計で測定した流速波形の振幅の平均値を、港口における波高によって計算された水粒子速度で無次元化したものである。

主防波堤を40cm延長したType-1とType-2、主防波堤を80cm延長したType-3とType-4は流速振幅の変化が周期2.0sおよび4.0s辺りで異なることより主防波堤の長さによる流速変化はみられるが、主防波堤の長さが同じであれば、副防波堤の突堤設置および通水路の開閉による流速の変化はあまり見られない。2成分合成波の流速振幅は、いずれのケースにおいても1成分の規則波のそれより小さい。

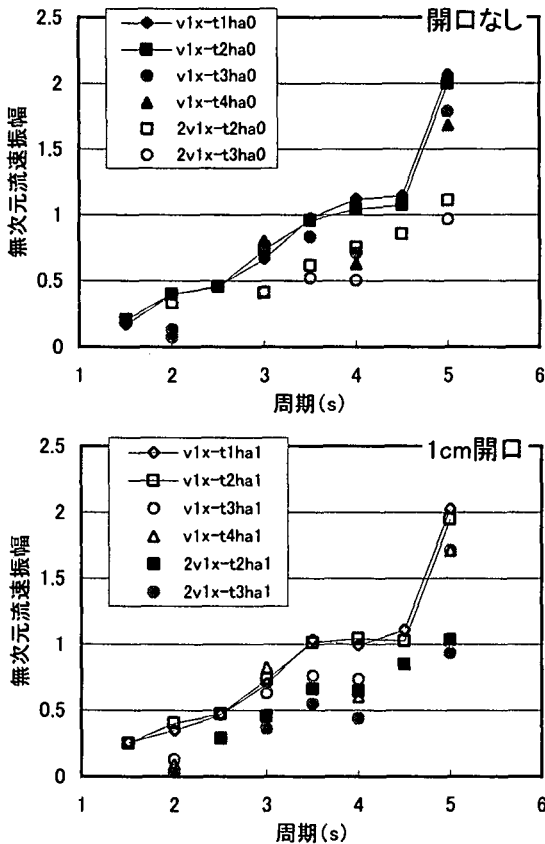


図-6 流速（港口，沿岸方向）

## (3) 流入砂量

図-7に、それぞれの港湾形状（Type-1～Type-4）において通水路を開閉（ha0：閉口，hal：1cm開口）した場合に測定された無次元流入砂量と入射波の周期の関係を示す。横軸は入射波の周期であり、縦軸は港内へ流入した砂の炉乾燥重量を漂砂量に変換して無次元化したもので、流入砂量の無次元化は式(1)で行なった。図中の2Qは、2成分合成波下での流入砂量であり、Type-2及びType-3において流入砂量が0でない結果のみを示している。

$$Q = \frac{Q'}{(\rho_s \times g) \cdot (u_s \times \Delta t \times \Delta A)} \quad (1)$$

ここで、 $Q'$ ：流入した砂の炉乾燥重量(g)， $u_s$ ：港口における波高によって計算された水粒子速度， $\Delta t$ ：造波時間， $\Delta A$ ：港口部の断面積である。

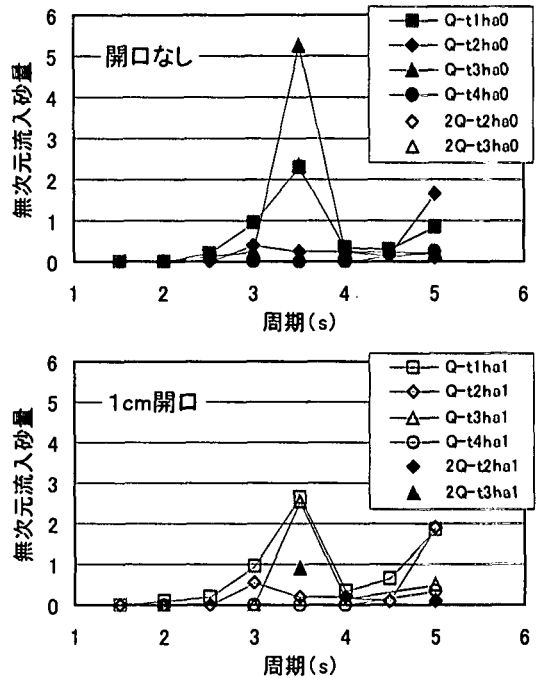


図-7 流入砂量（周期の影響）

まず、Type-1及びType-3の場合は、入射波の周期が3.5sの場合に極大値をとる。この場合、ビデオ画像解析結果によると副防波堤の先端付近で大きな剥離渦が形成され、それによって港外で巻き上げられた底質が港内に輸送され、沈降・堆積する様子が確認された。主防波堤を延長した場合は、これによる回折効果により、副防波堤先端で発生する渦が助長され、さらに大量の底質が港内に堆砂する結果となる。Type-3の周期3.5sの場合、通水路を1cm開口することによって50%程度に低減していることがわかる。周期3.5s以外のケースにおいては顕著な通水路の効果がみられない。

副防波堤の外側に小突堤を設置したケースのType-2及びType-4の場合は、突堤設置による剥離渦の低減効果が大きく通水路の影響は小さい。

周期0.8sと2.0s～5.0sを重ね合わせた2成分合成波の場合は、副防波堤の先端付近における剥離渦の大きさは1成分波のそれよりかなり弱くなっており、周期0.8+3.5s以外は港内堆砂がほとんど0であった。

以上の結果とビデオ解析より、副防波堤先端で発生する剥離渦は、長周期波に短周期波が乗せられた2成分合成波が入射した場合には、剥離渦が明らかに弱くなり港口部における流速および港内堆砂が減

少することが確認された。

図-8には通水路の開口高さによる流入砂量の変化を示した。入射波の周期が3.5sの場合に堆砂量が極大になったため、通水路開閉の影響については周期3.5sの結果を示した。2Qは2成分波(0.8s+3.5s)の結果を表す。開口率が大きくなるほど流入砂量は減少する傾向が認められる。また、2成分合成波も1成分波の結果と同様な傾向が見られる。

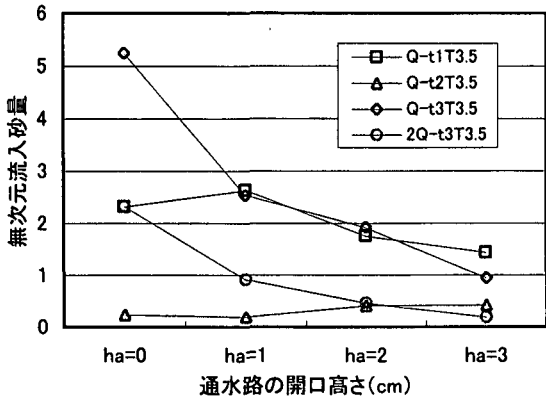


図-8 流入砂量 (通水路の影響)

図-9は、図-8に対応するケースにおける通水路の開口率変化による港口における波高および流速の変化を示したものである。v1xは沿岸方向の流速振幅の平均値を、港口における波高によって計算された水粒子速度で無次元化したもので、h4は港口の波高を入射波高で無次元化したものである。

流速振幅は、Type-1と2の場合は開口率の増加につれて増加するが、Type-3の場合はほぼ一定である。港口波高は、いずれの形状においても開口率の増加につれて減少する傾向である。港口流速については、測定位置が剥離渦の最大流速の発生位置と異なっており、剥離渦の特性を評価できていないとは言えず、港内堆砂量との相関性を説明するには十分ではなかった。

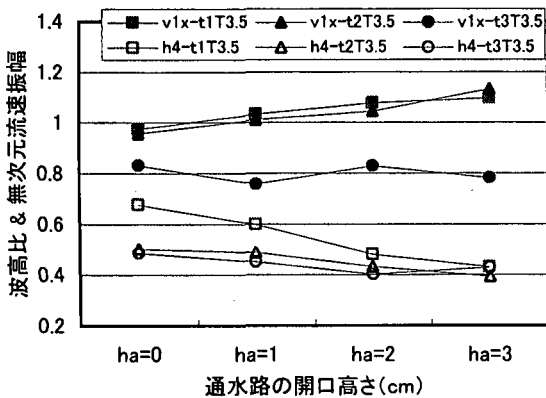


図-9 港口における波高および流速の変化

(4) 港口における流況

港内堆砂に及ぼす副防波堤先端の小突堤の影響及び周期3.5sの場合のみに選択的に生じた堆砂量低減効果の原因を明らかにするために港口周辺の流況の測定を行なった。流況測定はトレーサーを投入してその動きを上部からビデオカメラで撮影することによって行ない、剥離渦によって巻き上げられた漂砂を移動させる主な流れを代表的なトレーサーの動きとして検討した。図-10~図-13は、Type-1~Type-3の代表的なトレーサーの動きを表したものである。各図の右上の波形は流速波形であり、港外から港内方向を正(+ )として代表的なトレーサー動きの始点(○)と終点(●)の位相を示したものである。図中の流速はトレーサー動きの始点から終点までの平均流速を示す。

図-10は、Type-3の流況を示す。トレーサーの画像解析結果より、波の周期が長くなるにつれてトレーサーの移動範囲も広がり、港口周辺の漂砂移動も激しくなることが確認された。また、周期3.5sのとき

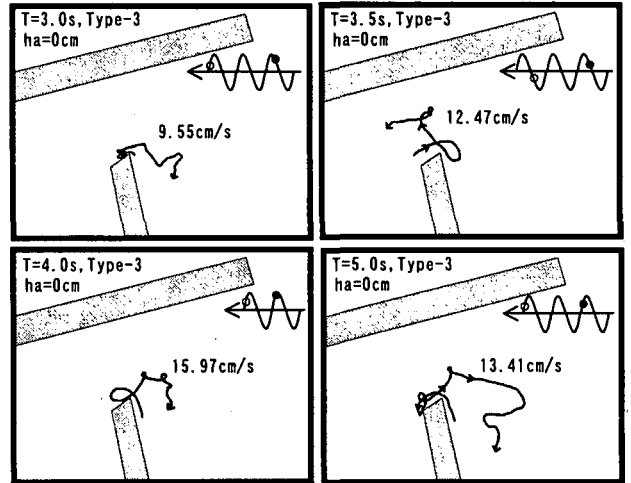


図-10 トレーサーの代表的な動き (Type-3)

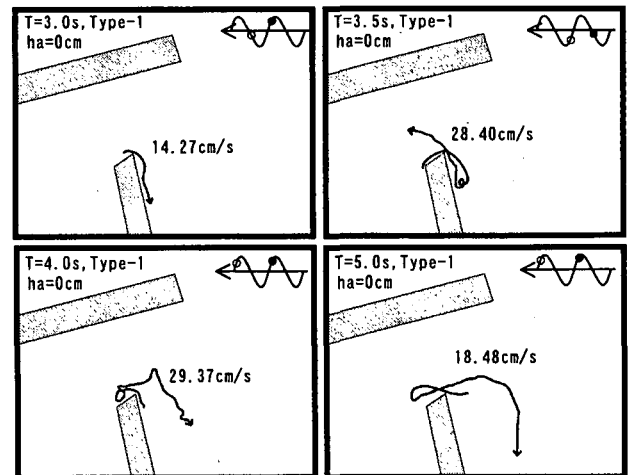


図-11 トレーサーの代表的な動き (Type-1)

の流れのパターンが他のパターンに比べて明らかに異なることも明らかになった。すなわち、周期3.5sの場合は港口における水粒子運動の位相が港内から港外に向かう時に副防波堤の外側で大きな渦が形成され、水粒子運動の位相が逆転したときにその渦によって巻き上げられた底質が港内に輸送される。他の周期の場合は副防波堤の外側に形成される渦が小さい（周期が3.0s以下）か、渦が形成されても位相の逆転に伴って流れが港内にまで輸送されない（周期が4.0s以上）。このような傾向は図-11のType-1においてもみられる。

この結果から、本研究に用いられた港湾模型の場合は周期3.5sの時に特殊な流れが生成され多量の漂砂移動の原因になると考えられる。

図-12は、Type-2の流況を示す。右上の流速波形は、各々上の流速波形が港内側、下の流速波形が港外側のトレーサーの動きの始点と終点の流速の位相を表している。このケースにおいては、副防波堤の外側に設置された小突堤によって港口を境にして内側と外側の流れが分けられていることがわかる。またこの小突堤は、副防波堤外側に形成される渦が港内に輸送されるのを妨げる効果を有する。これは、Type-2及びType-4の場合に流入砂量が減少した結果にも対応する結果であり、このように副防波堤先端での剥離渦の港内への輸送を阻止することによって港内堆砂を低減することができると考えられる。

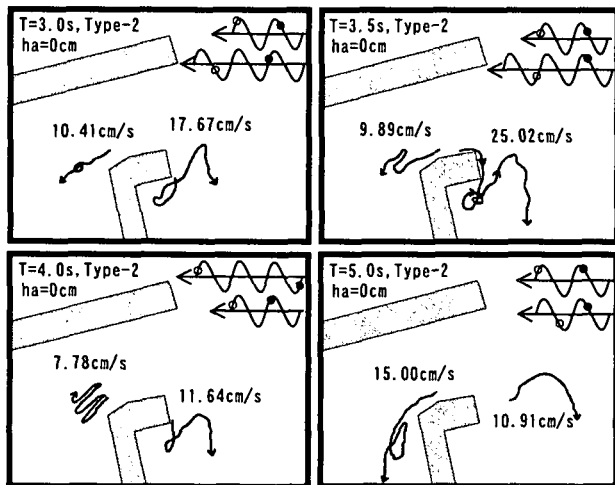


図-12 トレーサーの代表的な動き (Type-2)

図-13は、通水路の開閉による変化を見るためにType-3及びType-1の周期3.5sにおける通水路を1cm開口した場合の流況を示す。Type-2とType-4及び周期3.5s以外のケースにおいては通水路の開口による変化が殆どみられなかったため示していない。

図-10及び図-11に示す通水路を閉じた場合の流況と比較すると、Type-1の場合は副防波堤の外側のほぼ同一地点からのトレーサーの移動について見れば、港外に形成された渦にとり込まれて港内に輸送され

るのに要する時間は、通水路を開くことで、より長くなることを確認している。Type-3の場合は閉口した場合と明確な差異は生じていない。したがって、図-7と図-8に示したType-3の場合の通水路を開くことによる堆砂量の減少については、他の要因について検討する必要がある。

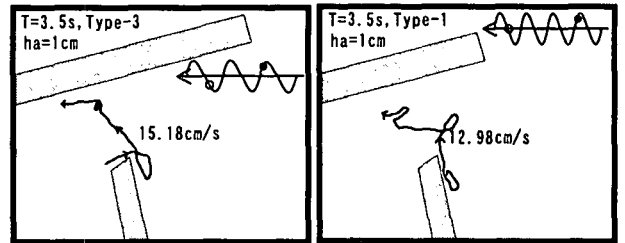


図-13 トレーサーの代表的な動き (通水路を開口)

#### 4. 結論

以上の結果から、本研究で対象とした港湾形状では、特定の入射波周期の場合に形成される副防波堤先端での剥離渦と港口周辺の水粒子運動によって多量の底質が港内に持ち込まれること、副防波堤先端の形状を変えること、あるいは通水路型防波堤を用いることにより顕著に堆砂量を減少させることができることが明らかになった。しかし、通水路型防波堤を用いた港湾に生ずる堆砂量の減少については、その機構を明らかにすることができなかった。今後この点に関する検討と、これらの実験事実の理論的な裏付けを行なうと同時に任意形状港湾における堆砂機構と堆砂量の定量的な予測法についてさらに検討を行なっていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 松本 朗, 松岡道男, 中山哲殿, 山本 潤, 灘岡和夫, 八木 宏: 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, 1993.
- 2) 森田修二, 出口一郎: 通水路型防波堤の通水特性に関する研究, 海洋開発論文集, 第16巻, pp.273-278, 2000.
- 3) 森田修二, 出口一郎, 尹晟鎮: 透過性防波堤を有する小規模港湾の海水交換機能に関する研究, 海洋開発論文集, 第17巻, pp.351-356, 2001.
- 4) 森田修二, 尹晟鎮, 出口一郎: 通水路型防波堤の波動による海水交換機能に関する研究, 海洋開発論文集, 第18巻, pp.521~526, 2002.
- 5) Lee, J. J.: Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry, *Journal of fluid mechanics* 45, pp.375-394, 1971.