

茱崎漁港の漂砂に関する実験(その1)

野 田 英 明

MODEL EXPERIMENTS ON SAND-DRIFT AT GUMIZAKI FISHERY HARBOR (PART I)

by *Hideaki* NODA

Synopsis

Gumizaki Fishery Harbor facing Japan Sea has been filled up by drifting sand annually. Therefore, it is requested to prevent the filling-up of the basin by drifting sand.

This paper reports the results of model experiments made to study the mechanism of coastal material movement and deposition in the basin and to consider some preventive measures against the filling-up of the basin by drifting sand.

Using vinyl pelets as model sediment, the height of deposition of sediment in the basin, current direction and velocity, and wave height in and out the basin have been measured in various cases. From the results of consideration based on the experiments, it is concluded that the behavior of filling-up of the basin by drifting sand can be reproduced by the experiment compared with the results of field investigation and the current in the basin generated by waves may play an important role to this problem.

1. ま え が き

茱崎漁港の泊地は毎年冬季風浪によつて、漂砂が堆積し、漁船の出入を不可能にすることもある。したがつて毎年浚渫を行なつて、漁港の機能を維持してきた。こうした防波堤開口部から土砂が卷込むことによつて、泊地の水深が浅くなる現象は砂浜海岸の港湾にはしばしばみられるもので、港湾の建設、修築にあたつて解決しておかなければならない重要な課題であろう。とくに茱崎漁港のように毎年短期間で埋没が急速に進行する場合には漁業活動にも支障をきたし、早急に埋没防止対策が樹立されるよう切望されてきた。この要望に答えて、昭和34年および35年に著者らにより現地調査¹⁾が行なわれ、泊地の埋没機構の究明に努めた。しかし、波浪、沿岸流、海岸地形や底質など多種の要因が複雑な作用を及ぼすため、現地調査のみでなく、模型実験をも行なつて、その堆積機構の究明ならびに有効な防止策の発見に努めるべきであると考えていた。その後、福井県からの要請もあつて、この研究も継続して実施するはこびとなり、模型実験を行なうことになった。この論文はその実験の結果の一部を報告しようとするものであつて、漂砂の堆積機構を各種の方法によつて究明するとともに、埋没防止対策の二、三の試みについて行なつた実験の結果を述べたものである。

2. 茱崎漁港の現況について

茱崎漁港は福井市の西部約 20 km にある日本海に面した一小漁港である。**Fig. 1** はその海岸付近および海底地形をしめすもので、海岸には各所に岩礁が存在し、海底地形もかなり複雑で、茱崎漁港の前面では距岸約 500 m で水深が 10 m となっている。またその両側には距岸約 200 m で水深が 9 ~ 11 m の深い部分がある。漁

港の防波堤は延長約 300 m で南北に長く、泊地の長さは約 200 m、幅は約 25 m、水深は約 2.0 m であって、その形はほぼ長方形である。港口は港の南端にあり、波を遮蔽するため SW の方向に約 40 m 防波堤が延長され

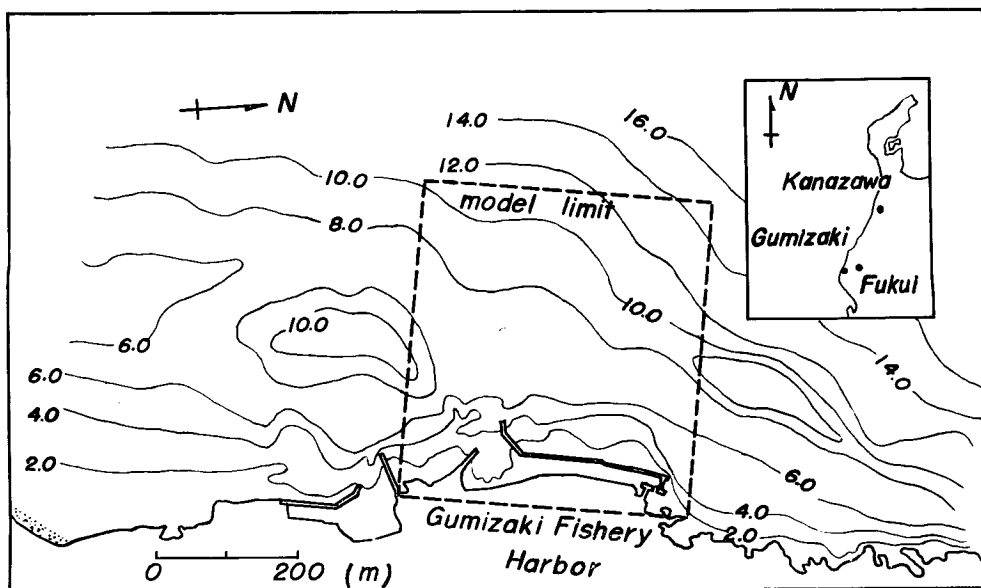


Fig. 1 Topographical map of the adjacent of Gumizaki Harbor

ている。一方港奥すなわち港の北端には防波堤の一部が幅約 4 m にわたって切欠かれ開口部となっている。漁船の出入には泊地の水深が 1.8~2.0 m 必要であって、冬季風浪の来襲ごとに浅くなると漁業活動にも支障をきたすようになる。冬季の風浪はほとんど Storm によるもので、1 回の Storm は大体 10~20 時間続くことが現地調査の結果明らかとなった。この風浪の特性は波高 4.0 m 程度、周期約 6 sec で、波向は NW および NNW のものが大部分である。

港内泊地における底質はその粒径が 0.13~0.32 mm であり、港外のそれはほぼ 0.4 mm である。なお、この海岸には明白な漂砂の供給源がみられないので、港内に堆積する漂砂は港外に広く分布している底質が波の作用によって浮遊し、港内に運搬されてきたものと考えられる。

3. 模型実験の相似律に関する考察

一般に水理模型実験においては現地と模型とで力学的相似がなりたたねばならない。とくに本研究のように単に水の運動ばかりでなく、土砂の輸送をとまなう場合には、これに関する力学的相似をも満足する必要がある。

砕波にいたるまでの波の運動に関する相似律は、摩擦による波の変形が無視できる場合、Froude の相似則にしたがい水平および鉛直方向の長さの縮尺を同一に選ぶことによって、模型を相似にすることが期待できる。

いま、波高を H 、波長を L 、波の周期を T 、波速を c 、水粒子の水平速度を u とし、水深を h で表わすと、歪めない模型の場合には Froude の相似則によってつぎの関係がえられる。すなわち、

$$\frac{H_p}{H_m} = \frac{L_p}{L_m} = \frac{h_p}{h_m} = \frac{l_p}{l_m} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{T_p}{T_m} = \frac{u_p}{u_m} = \frac{c_p}{c_m} = \frac{t_p}{t_m} = \left(\frac{l_p}{l_m}\right)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここに添字 p および m はそれぞれ現地および模型を表わし、 l および t はそれぞれ長さと時間を表わしている。

一方、漂砂を直接支配するのは砕波後の波や流れの特性であつて、この場合には海底摩擦の影響も無視できないと考えられる。しかも Diephuis²⁾ が実験によって明らかにしたように、模型が小さくなって、周期の短い波を使用すると砕波水深に周期の効果が入ってくることになる。そのため砕波を含む実験では、できるだけ模型を大きくして、長い周期の波を用いた方がよいとされているが、砕波の機構が十分明らかでない現在、厳密に相似の条件を定めることは困難であろう。したがって、周期の影響が入らない程度に模型を大きくすれば、砕波前の波の特性が Froude の相似則を満足していることから、砕波後の水の運動についても一応、Froude の相似則がそのまま適用されうであろう。

つぎに重要な問題は底質の移動に関する相似関係を定めることである。波による底質移動の機構が明らかでない現在、普遍的な力学的相似の条件を定めることは困難である。そこで、現状では模型実験の結果と現地の観測資料とを比較して、その再現性を検証する方法がとられている。しかしいづれにしても、模型実験に使用する底質の選定にあつては、できるだけ底質輸送の力学的機構を考え、相似の条件を見い出すことが必要である。榎木³⁾ は汀線と直角方向の底質移動に関する力学的機構を考慮し、漂砂量公式と限界流速を示す式とから波による掃流砂に関してその相似性を定めている。しかし本実験では掃流砂よりもむしろ浮遊砂が泊地の埋没に重要な役割をはたすと考えられ、これに着目して、相似関係を定める必要があろう。

いま波による浮遊砂の濃度の時間的平均値を $\bar{C}$ とすると、濃度分布に関する方程式は

$$w_o \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right) = 0 \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここに z は水底から鉛直上向きにとる。また w_o は浮遊砂の沈降速度であり、 ε_z は波による z 方向の渦動拡散係数である。現地と模型とで力学的相似がなりたつためには、現地(添字 p) に対する(3)式と模型(添字 m) に対するそれとにおいて対応する各項の比が等しければよい。すなわち(3)式より

$$\frac{w_{op} \bar{C}_p / z_p}{w_{om} \bar{C}_m / z_m} = \frac{\varepsilon_{zp} \bar{C}_p / z_p^2}{\varepsilon_{zm} \bar{C}_m / z_m^2} \dots\dots\dots (4)$$

の等式がなりたつ必要がある。(4)式を整理すると、

$$\frac{w_{op}}{w_{om}} = \left(\frac{\varepsilon_{zp}}{\varepsilon_{zm}} \right) \left(\frac{z_p}{z_m} \right)^{-1} \dots\dots\dots (5)$$

となる。したがって波による渦動粘性係数が明らかであれば、浮遊砂の輸送に関する相似関係を定めることができる。本間、堀川、鹿島ら⁴⁾ はこの拡散係数を

$$\varepsilon_z = \kappa^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|^2 / \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)^2 \dots\dots\dots (6)$$

と仮定した。ここに、 κ は Kármán 定数であり、 u は水粒子の水平速度である。彼らは(6)式における u に対して Airy の理論を用いて ε_z を導いているが、底質の浮遊は波の攪乱作用と密接な関連をもつと考えられ、乱れの効果が Airy の理論によつて表現されうかどうかはうたがわしい。一方岸ら⁵⁾ は梶浦⁶⁾ の理論にもとづいて、乱れの効果を導入し、 ε_z に対して

$$\varepsilon_z = \kappa \bar{u}_B^* (z + z_o) \dots\dots\dots (7)$$

を仮定し濃度分布を求めて、実験結果と比較し、かなりよく一致することを見出した。ここに、 z は水底か

らの高さ, z_0 は roughness length であり, u_B^* は波による摩擦速度の最大値に比例する量である。いま(7)式がなりたつものとして, これを(5)式に代入し, $\kappa_p = \kappa_m$ さらに $u_B^{*2} = C_f u_b^2 / 2$ を考慮すると, (5)式は

$$\frac{w_{op}}{w_{om}} = \left(\frac{C_{fp}}{C_{fm}} \right)^{1/2} \left(\frac{u_{bp}}{u_{bm}} \right) \dots\dots\dots (8)$$

となる。ここに C_f は海底の摩擦係数であり, u_b は海底における水粒子の最大水平速度である。以上により, 現地と模型との底質に対する相似関係は沈降速度の比で表されることがわかる。さらにその相似の条件には, Reynolds 数と海底粗度との関数と考えられる C_f の値が関係することになる。岩垣・柿沼ら⁷⁾は波浪観測の結果から各地海岸の海底摩擦係数を算出しているが, いまだ適確にその値を推定できる段階にはいたっていない。一方模型における海底摩擦係数も移動床模型では任意にこれを選定することが困難であり, かつ現地が乱流であっても, 模型が乱流であるか層流であるかの判定も波運動の場合にはきわめて困難である。そこで, 簡単のために, $C_{fp}/C_{fm}=1$ と仮定すると, (8)式は

$$\frac{w_{op}}{w_{om}} = \left(\frac{u_{bp}}{u_{bm}} \right) = \left(\frac{l_p}{l_m} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

となる。これは現地に対する底質と模型に対するそれとの沈降速度の縮尺が長さの縮尺の1/2乗に比例することを示している。Fig. 2は(9)式にもとづく計算結果の一例で, $w_{op}=6.37$ cm/s (粒径 $d_p=0.4$ mm, 比重 $S_p=2.65$, 水温 20°C) に対する模型底質の粒径 d_m と比重 S_m との関係を l_p/l_m ごとに示したものである。したがって(9)式がなりたつとすれば, 模型底質の選定にあたっては, 種々の現地底質に対して, これと同様な図から, 模型に使用する底質の粒径と比重との関係および模型の縮尺を定めることができる。

4. 実験装置および方法

実験に使用した模型は 10.5×12.5 mのコンクリート製平面水槽内に, Fig. 1に示す範囲の海底地形を水平および鉛直縮尺1/50で作製した。模型実験に含まれる範囲は底質の移動限界水深を考慮して, 最大水深を10 mとし距岸500 mの範囲をとった。なお港内泊地の水深は2 mとした。水槽の底面はコンクリートの固定床とし, その上に防水モルタルで現地の海底地形と合致するようこて仕上げとした。また漂砂の侵入する港口および港奥の開口部は5~10 cm掘下げて, そのなかに底質を敷並べ移動床とした。なお波の反射をできるだけ少くするために, 水槽側壁および防波堤前面に消波用アルミ薄と小さいテトラポットを設置した。

実験波は水槽の一端水深20 cmの水平床に設置したフラッター式造波機を用いて起こした。この造波機は長さ10 mの造波板をもち, 無段変速機によって周期を, また造波板に接続したアームの長さを変えることによって波高を連続的に変えることができるようになっている。

沖波は水深20 cmの水平床に電気抵抗式波高計を, また港内の波高は泊地に別個の同じ形の波高計を設置して, その水位変動を自動平衡型ペン書きオシログラフに自記させた。

港内の表面流速は直径約2.5 cm, 厚さ約2 mmのコルク板を黒く塗って浮子とし, その浮子を水面上約5 mの高さから, 1.4 secごとに写真撮影した。

泊地における底質の堆積状況は, 水槽内に作製した0.2 m間隔の網目の交点で, ポイントゲージを用いて水深を測定した。測定は実験開始後0.5時間, 1.0時間, 1.5時間……と続け, ほぼ平衡状態になるまで実験を続けた。

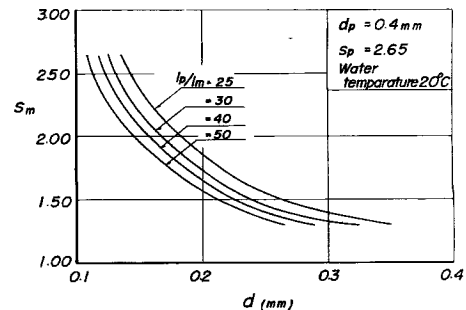


Fig. 2 Relation between size and specific gravity of model sediment with various values of l_p/l_m , in the case of $w_{op}=6.37$ cm/s.

実験の対象となる現地の波の特性は、従来の調査結果から、波向 NW、波高 4 m、周期 6 sec の波とし、底質の特性は中央粒径を 0.2 mm、比重を 2.65 と定めた。したがって、長さの縮尺を 1/50 にすれば、Froude の相似則から実験に使用する波の周期は 0.85 sec、波高は 8 cm となる。この場合実験に使用する波の沖波波形勾配は 0.073 と大きく、かつ周期は 0.85 sec と短いため、Diephuis の実験結果を参照すると、碎波水深にやや縮尺の効果が入ることになり、厳密には碎波後の水の運動に関する相似の条件を満足しない。しかし後述する底質輸送に関する相似の条件も十分厳密なものであるとはいえないから、この点は現地の調査資料と比較しながら模型の再現性を検証することによって確かめたい。

実験に使用した底質は比重が 1.15 の塩化ビニール粒で、その粒度分布は Fig. 3 のようであり、この図から中央粒径は 0.13 mm となることがわかる。この底質が現地の底質 ($d_p=0.2$ mm, $S_p=2.65$) と相似の条件を満足するためには、(8) 式の関係がなりたたねばならない。それには C_{fp} , C_{fm} の値を知る必要がある。しかし上述のように、現状では C_{fp} の値を適確に推定できるまでにはいたっていないし、 C_{fm} も任意に選ぶことができない。したがって、ここでは一応(9)式の関係を用いて、模型実験に使用する模型底質と現地砂との相似関係を検討してみよう。Fig. 4 は(9)式において現地砂の比重 S_p を 2.65 とし、粒径 d_p が 0.4, 0.2 および 0.15 mm に対応する模型底質の粒径と比重との関係を $l_p/l_m=50$ の場合について計算した結果である。図中の⊗印は上述の実験に用いた塩化ビニール粒の比重と粒径を示している。この図からわかるように、現地砂 ($d_p=0.2$ mm, $S_p=2.65$) に対し模型底質はやや小さいが、上に仮定した相似の条件をほぼ満足しているといえよう。

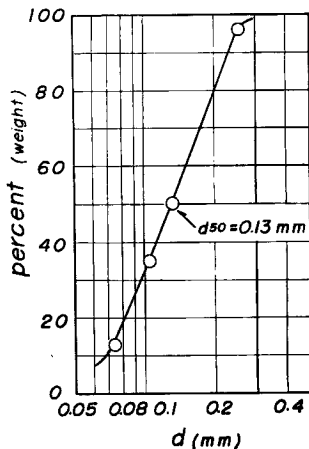


Fig. 3 Sieve analysis of vinyl pelets using model experiments, as model sediment.

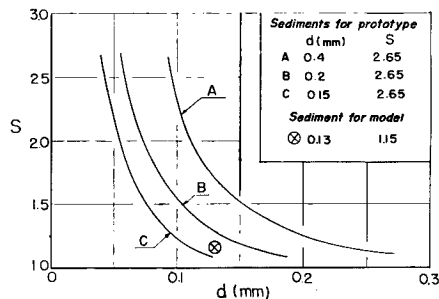


Fig. 4 Relation between size and specific gravity of model sediment. (for $l_p/l_m=50$)

5. 実験結果とその考察

模型実験はつぎに述べるような項目について行なった。すなわち

実験A：現地の観測資料と模型実験の結果とを比較して、実験の再現性を検証すること、

実験B：現状における泊地の埋没機構を実験によって究明すること、および、

実験C：2, 3の防波堤あるいは防砂堤配置を考え、これに対する埋没防止機能を検討すること、

である。以上のうち、**実験A**は固定床による表面流の状況および移動床による漂砂の堆積状況を現地の観測資料と比較し、実験の再現性を検討した。**実験B**は泊地の埋没機構を究明するため、漂砂の供給状態を変

えて3種類の実験を行なった。また**実験C**は移動床によって2種類の実験を行ない、港の形状を変えた場合の埋没防止効果について比較実験を行なった。つぎに、これらの結果を上順序にしたがって詳述していく。

(1) 模型実験の再現性(実験A)

前節で述べたように、漂砂の運動をともなう水理実験では、いまだ十分な相似法則が確立されていない。したがって、現地でえられた資料と実験の結果とを比較することによって、現地と模型との相似性を検証してはじめて、模型実験の結果を現地に適用することができることになる。

Fig. 5 は昭和34年12月14日から16日までの3日間に行なった港内の表面流向、流速の観測結果である。表面流の観測は直径約20cmのゴムボールと石塊(水面下約1m)とを麻ロープで結んで浮標とし、この浮標の位置を30secごとに2台のトランシットで追跡した。図中の矢印はその流向を、丸印は30secごとの浮標の位置を示している。なお表面流観測中は波高を測定しなかったが、三国港における風向、風速がそれぞれWNW, 9.4~9.8m/sであったことから、茅崎漁港における有義波高はほぼ2.0mであったと推定される。

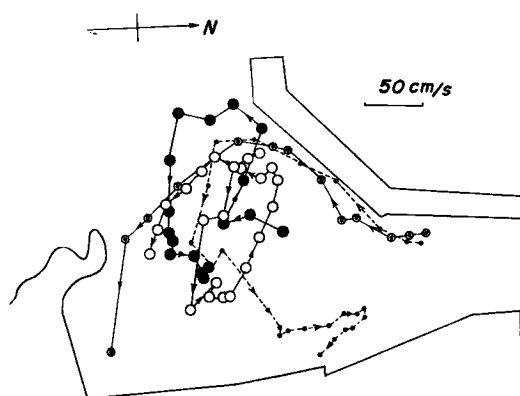


Fig. 5 Direction of coastal current (results of field investigation)

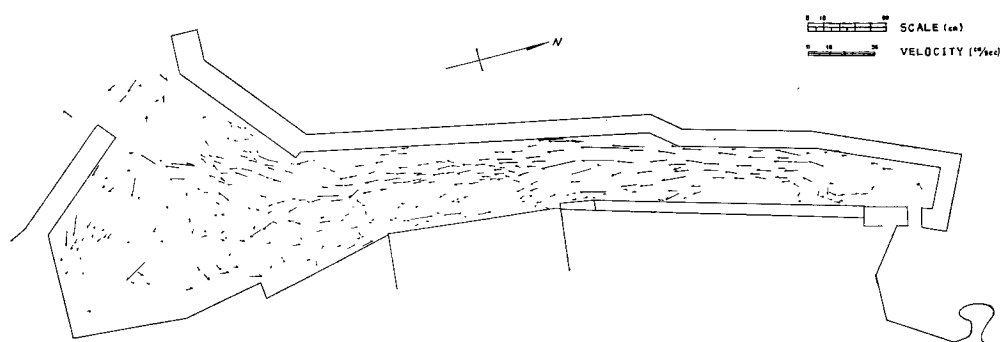


Fig. 6 Direction and Velocity of current (results of model experiment)

一方、**Fig. 6** は模型実験における表面流向、流速をベクトル記号で示したものである。これらの図から、現地でも、模型実験においても、港口近くの泊地では反時計廻りの循環流がみられ、かつ流速も大体相似関係にあると考えられる。したがって、一応流れに関してはほぼ相似の条件が満足されているといえよう。

Fig. 7 は泊地内における漂砂の堆積状況を模型実験の結果と現地の資料とにもとづいて比較したもので

ある。この図の横軸の数字は、Fig. 8 に示す測深点の番号であって、図中の実線が模型での実験開始後 5 時間を経たときの堆積状態を示している。一方現地の資料は昭和34年12月13日および19日に行われた深淺測量の結果であって、この期間中に一度 Storm が襲っている。実験は Fig. 8 に示すハッチの部分を移動床とし、実験中には底質を補給しなかった。実験中の漂砂の堆積状況は、開始後30分まできわめて急速であった

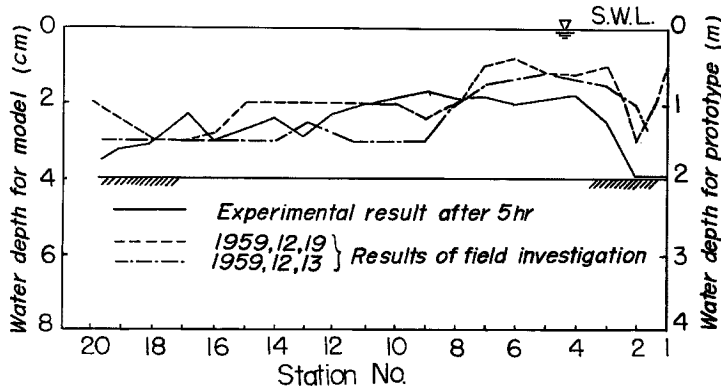


Fig. 7 Comparison between deposit profiles of model and prototype

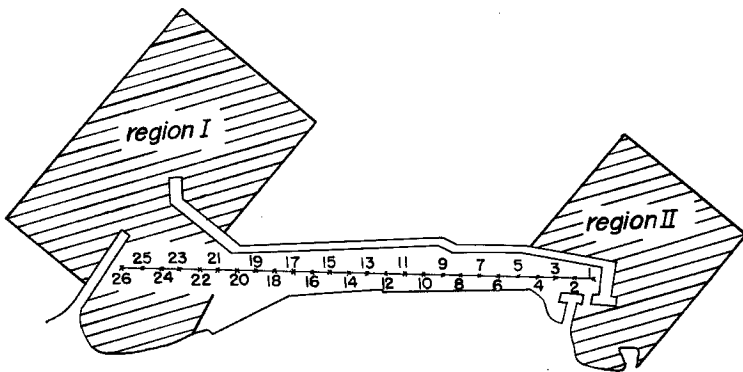


Fig. 8 Station of sounding in the basin for prototype and model.

が、その後は局所の変化がみられる程度で、3～5時間後にはほぼ平衡状態となった。この図から明かなように、その堆積状況は現地のそれとほぼ一致しているようであって、底質の移動に関する相似の条件も満足されているといえよう。

以上により、模型実験の結果は現地の状況をかなりよく再現しているようであるから、埋没機構およびその防止策に対する実験結果を現地へ適用しても、かなり妥当な結果をうることが期待できる。ただ注意すべきことは、この実験結果が特定な波についてのものでありどんな条件の波に対しても上の相似関係がなりたつかどうか、また実験中に底質を補給しなかった影響はどうかなど不明な点もあり、上述の相似関係が普遍的な一般性をもつかどうかは今後さらに検討する必要がある。

(2) 埋没機構に関する 2, 3 の実験 (実験 B)

以上により若干の問題点もあるが、一応模型の再現性が検証されたので、現状での埋没機構を明らかにするため若干の実験を行なった。行なった実験の条件は Table 1 に示すようである。Table 1 において region

IおよびIIは Fig. 8 に示す領域で水槽底面を 5~10cm 掘下げ、塩化ビニール粒を敷並べて移動床とするかまたは玉砂利をおいて固定床とできるようにした。

Table 1 Condition of experiment

Experiment	B - 1	B - 2	B - 3
Bed condition			
region I	movable bed	fixed bed	movable bed
region II	movable bed	movable bed	fixed bed
Supplied sediment	not supplying	supplying	supplying

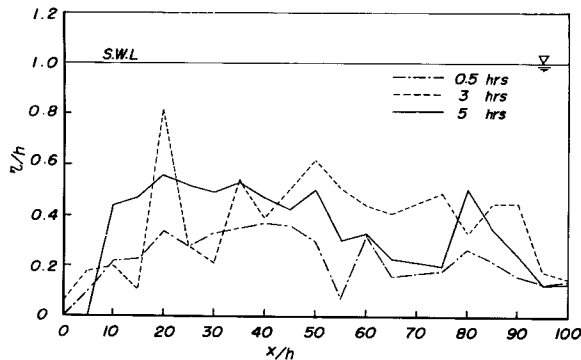


Fig. 9 Experimental result of deposit profiles in various time in the case of B-1

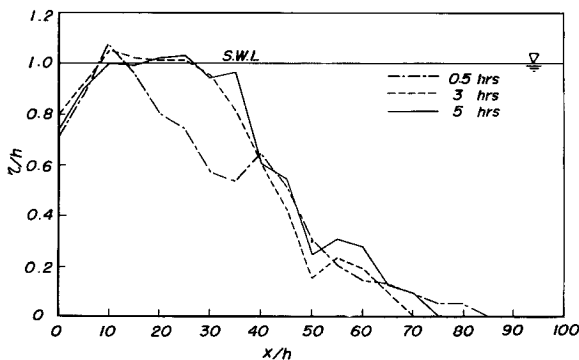


Fig. 10 Experimental results of deposit profiles in various time, in the case of B-2

Fig. 9 は B-1 の実験結果であって、実験開始後それぞれ 0.5 時間、3 時間および 5 時間における堆積高の場所的变化を無次元表示したものである。ここに η は堆積高、 h は泊地の初期水深であって、 x は Fig. 8 における St. No. 1 を原点にとつてある。実験によると、実験開始後 0.5 時間までは堆積高は急激に変化するが、それ以後は局所的な変化があるのみで 5 時間以後はほとんど変化しなくなる。またこの図からも明らかなように、5 時間後における堆積高の最大は $x/h=20$ (St. No. 5) に現われ、その最大値は約 0.6 であって、初期水深の約 6 割が埋没することがわかる。なお $x/h=20$ はかなり港奥であって、港奥開口部からの流れが泊地の埋没に非常に重要な役割をはたしていると考えられる。さらに問題となるのは実験開始後 3 時間もたつと、港外移動床における漂砂の移動が激しく現地の海底地形と一致しなくなるとともに、両開口部における浮遊砂濃度も減少することである。これは泊地内の漂砂堆積に影響をおよぼすと考えられ、実験中に底質を補給する場合についても検討する必要があると考えられる。

つぎに実験 B-2 は港奥からの流れの効果を明らかにするために行なったものである。実験は領域 I を固定床とし、実験中 30 分ごとに底質を補給しながら領域 II の移動床が現地の海底地形と合致するよう調整した。Fig. 10 は B-2 に対する実験結果であって、実験開始後それぞれ 30 分、3 および 5 時間を経たときの泊地の堆積高を無次元表示したものである。この図から明らかなように、底質を補給すると、堆積高はきわ

めて大きくなり、ほぼ水面まで埋没することがわかる。また領域 I が固定床であるため泊地内への流入土砂は港奥開口部からのみであって、Fig. 6 に示すような流れが土砂の流入、堆積に大きな影響をおよぼしていることは明らかであろう。かつ港外における浮遊砂の濃度分布が、港内の堆積土砂量に大きな影響をおよぼすことも明らかである。

この流れによる漂砂の堆積機構について、きわめて粗雑ではあるが、いまいし検討してみよう。簡単のため一様な水深 h を有する長方形の港を考える。水底に港の長さ方向に x 軸をとり、その原点を港奥開口部におく。なお z 軸は鉛直上向きとする。 x 方向の流速は u_0 と一定とし、渦動拡散係数 ε も一定とすると、港内における浮遊砂の濃度 C に関する方程式は

$$u_0 \frac{\partial C}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + w_0 \frac{\partial C}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。ここに w_0 は浮遊砂の沈降速度である。また境界条件は

$$\begin{aligned} \text{水底 } z=0 \text{ で } \frac{\partial C}{\partial z} &= 0 \\ \text{水面 } z=h \text{ で } \varepsilon \frac{\partial C}{\partial z} + w_0 C &= 0 \quad \dots\dots\dots (11) \\ \text{入口 } x=0 \text{ で } C(x, z) &= C_0(z) \end{aligned}$$

となる。この方程式の解は合田⁸⁾が沈砂池の浄化効率に関する論文で求めている。その結果を参照すると、 C_0 が一定の場合

$$\frac{C}{C_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F_n(z) \sin k_n h}{1 + \frac{(k_n h)^2}{R} + \frac{R}{4}} \exp \left[\frac{R}{2} - \left\{ \frac{R}{4} + \frac{(k_n h)^2}{R} \right\} \left(\frac{w_0}{u_0} \right) \left(\frac{x}{h} \right) - \frac{R}{2} \left(\frac{z}{h} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。ここに

$$R = w_0 h / \varepsilon \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$F_n(z) = \sin(k_n h) (z/h) + \frac{2k_n h}{R} \cos(k_n h) \left(\frac{z}{h} \right) \quad \dots\dots\dots (14)$$

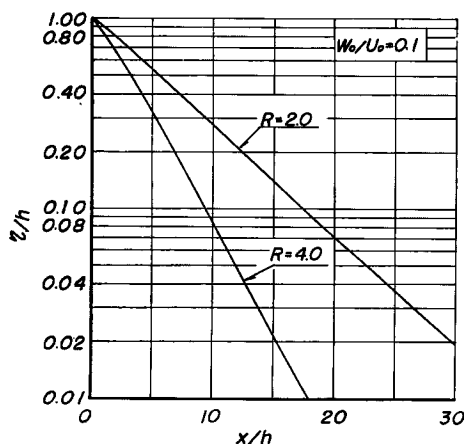
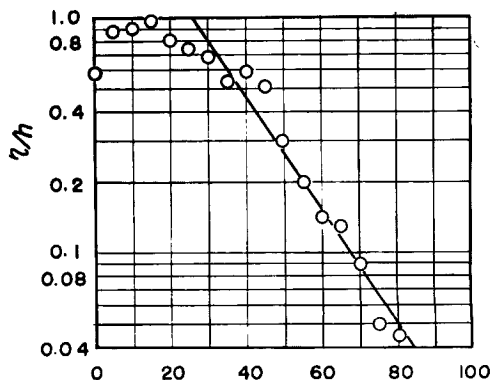
$$k_n h = \arctan \frac{R(k_n h)}{(k_n h)^2 - (R/2)^2} \quad (n=1, 2, 3, \dots\dots) \quad \dots\dots\dots (15)$$

である。(12)式から、 $x=0$ における浮遊砂量を $q_0 (=C_0 u_0 b)$ とすると、任意の場所 x における浮遊砂量 q_s は

$$\begin{aligned} \frac{q_s}{q_0} &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(k_n h) \sin k_n h}{\left\{ 1 + \frac{(k_n h)^2}{R} + \frac{R}{4} \right\} \left\{ \left(\frac{R}{2} \right)^2 + (k_n h)^2 \right\}} \times \\ &\quad \exp \left[-\frac{1}{R} \left\{ \left(\frac{R}{2} \right)^2 + (k_n h)^2 \right\} \left(\frac{w_0}{u_0} \right) \left(\frac{x}{h} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

となる。(16)式の右辺の級数は R の値が小さくなるにしたがって、収斂がきわめてよくなる。Fig. 11 は(16)式にもとづいて、 $w_0/u_0=0.1$ の場合の $R=2.0$ および $R=4.0$ に対する q_s/q_0 と x/h との関係を計算した結果である。この図から、浮遊砂量の場所的变化は R によって変化し、とくに R の値が小さくなると、浮遊砂が沈降しにくくなることがわかる。そこでいま、流砂の連続式を考慮すると、泊地における相対堆積高 η/h は、微小な項を無視して $\left[-\frac{R}{4} (w_0/u_0) (x/h) \right]$ に比例すると考えられる。そこでこれらの対数をとると、

$$\log \left(\frac{\eta}{h} \right) \propto 0.434 \left[-\frac{R}{4} \left(\frac{w_0}{u_0} \right) \left(\frac{x}{h} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (17)$$

Fig. 11 Relation between q_i/q_0 and x/h Fig. 12 Relation between η/h and x/h , after 30min in the case of B-2.

となる。Fig. 12は実験B-2の実験開始後30分を経たときの η/h と x/h との関係を半対数紙上に plot したものである。実験開始後かなりの時間を経ているため、(17)式の関係がなりたつかどうか疑わしいが、図中に示す実線の勾配を利用して R の値を求めると $(R/4)(w_0/u_0)=0.055$ となる。実験に用いた底質の沈降速は $w_0=0.23$ cm/s であり、かつ港奥からの流れはほぼ一定と考え、Fig. 6 から $u_0=5.4$ cm/s (表面流速 $u_s=7$ cm/s) とすると、 $R=5.2$ となる。いま Kalinske⁹⁾ が用いたと同じ表現を用いれば $\varepsilon=u_*h/15$ となるから、 $R=5.2$ に対して $w_0/u_*=0.35$ となる。浮遊砂が平衡状態にある場合、 w_0/u_* の値はほぼ0.25といわれ、堆積高の勾配から求めた $w_0/u_*=0.35$ より小さく、港内においては浮遊砂がかなり沈降しやすいことを示している。一方、平均流速を $u_0=5.4$ cm/s、水深を $h=4.0$ cm とし Manning の粗度係数を $n=0.015$ (m-sec) とし流れの摩擦速度 u_* を計算すると $u_*=0.43$ cm/s となり、結局 $w_0/u_*=0.54$ となる。この値と堆積高の勾配から求めた値を比較すると、前者がかなり大きくなっている。

Fig. 13 は泊地における波高分布を示したもので、縦軸は沖波との相対波高で、横軸は x/h であり、 $x/h=0$ は Fig. 8 における St. No. 1 をまた $x/h=120$ は St. No. 26 を示している。著者ら¹⁰⁾ の波による移動限界に関する論文を参照して、波による摩擦速度の最大値 u_B^* および w_0/u_B^* の値を計算すると Table 2 のようになる。この表からわかるように波による w_0/u_B^* の値は $x/h=100$ を除いて0.11~0.17の範囲にあることがわかる。岸ら¹¹⁾ によると波による浮遊の場合、平衡状態で $w_0/u_B^*=1.0$ になることを示しているから、泊地内では波によってきわめて底質が浮きや

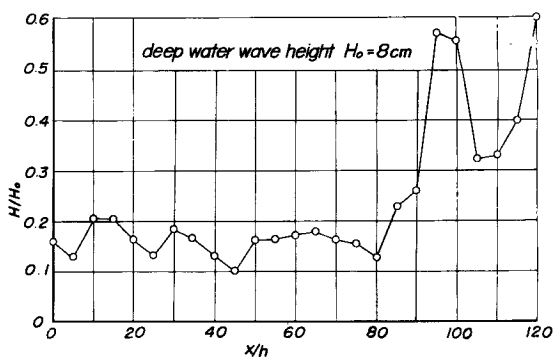


Fig. 13 Distribution of wave height in the basin.

すい状態にあると考えられる。このことは堆積高の勾配から求めた $w_0/u_*=0.35$ という値が、波のない流れだけの場合の $w_0/u_*=0.54$ という値より小さいことと関係があると考えられる。すなわち $w_0/u_*=0.35$ には波による浮遊の効果が入っていると考えられ、波と流れとが相互に影響をおよぼしあって、浮遊砂の堆

Table 2 Shear velocity by wave motion in the basin

x/h	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$H(\text{cm})$	1.28	1.04	1.64	1.64	1.32	1.08	1.48	1.36	1.08	0.84
$u_b(\text{cm/s})$	9.28	7.55	11.90	11.90	9.56	7.83	10.71	9.86	7.83	6.10
$u_B^*(\text{cm/s})$	1.59	1.44	1.81	1.81	1.62	1.46	1.72	1.64	1.46	1.39
w_0/u_B^*	0.14	0.16	0.13	0.13	0.14	0.16	0.13	0.14	0.16	0.17

x/h	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
$H(\text{cm})$	1.32	1.32	1.40	1.44	1.32	1.24	1.04	1.84	2.08	4.60
$u_b(\text{cm/s})$	9.56	9.56	10.15	10.43	9.56	9.00	7.55	13.32	15.10	33.40
$u_B^*(\text{cm/s})$	1.62	1.62	1.67	1.69	1.62	1.57	1.44	1.90	2.04	3.03
w_0/u_B^*	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.16	0.12	0.11	0.08

where $w_0=0.23 \text{ cm/s}$ at 10°C

積に対してある平衡状態を保っていると推定される。なお当然のことではあるが、港奥開口部の流入砂量 q_0 が小さくなれば、堆積高の勾配も緩かになると考えられる。以上漂砂の堆積におよぼす流れの効果を検討してきたが、波による底質の浮遊も、泊地の埋没に微妙な影響を与えることが明らかにされた。Fig. 14 は B-3 に対する実験結果であって、港口から底質が流入する場合の堆積状況を示している。B-2 に対して堆積量はかなり少ないが、堆積高には周期的な変動がみられ、現地調査における静振の効果と比較するときわめて興味深い。この点については周波数分析器を用いて港内の波高を目下解析中であり、現在のところ明確な結論をうるにいたっていない。

(3) 埋没防止に対する 2, 3 の実験 (実験 C)

以上により、港奥からの流れがきわめて大きい影響をおよぼすことが明らかとなったので、港奥開口部を

締切った場合 (実験 C-1)、さらに波による浮遊の効果を減ずるため、港口における防波堤を SW 方向にさらに 40 m 延長した場合 (実験 C-2) の実験を行ない、埋没防止の機能を確認めた。Fig. 15 は C-1 に対する実験結果であるが、港奥を締切ると $x/h=60\sim70$ 付近の堆積が多いのみで、実験 B とくらべて泊地全体の堆積土砂量はきわめて少なくなり、漂砂の堆積に対して流れの効果が顕著であることを示している。しかし泊地への漁船の出入に支障をきたす点では実験 B の場合と大差ない。

Fig. 16 は C-2 に対する実験結果であって、港奥を締切った上、さらに、港口防波堤を延長した場合であ

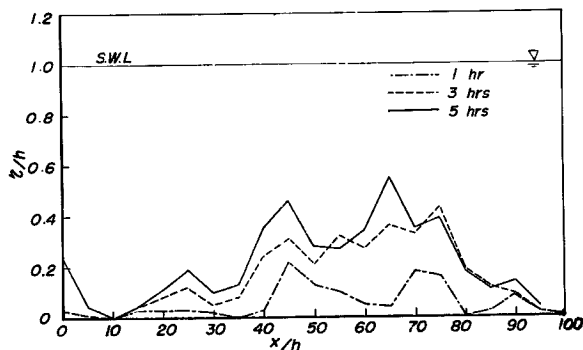


Fig. 14 Experimental results of deposit profiles in various times, in the case of B-3

る。この図から明らかなように、実験C-1と比較して、堆積高が高く堆積土砂は、水面上に出ようになる。このことは防波堤を延長したことによってかえって泊地の埋没がひどくなったことを示している。その原因はまだ明らかでないが、Fig17のC-2に対する固定床での波高分布と比較すると、波高のかなり大きい領域で、堆積高が大きくなっていることがわかる。

以上の結果を要約すると、港奥を締切り港内の流れを遮断すると堆積高はきわめて少なくなる傾向がある。しかし防波堤の配置を誤ると、かえって堆積量を増す結果となることがあり、それぞれの要素について慎重な検討が必要である。

6. 結 語

以上、茅崎漁港の埋没に関して実験を行ない、漂砂の堆積におよぼす波とか流れの効果を検討してきた。さらに漂砂に関する模型実験において比重の小さい塩化ビニール粒を使

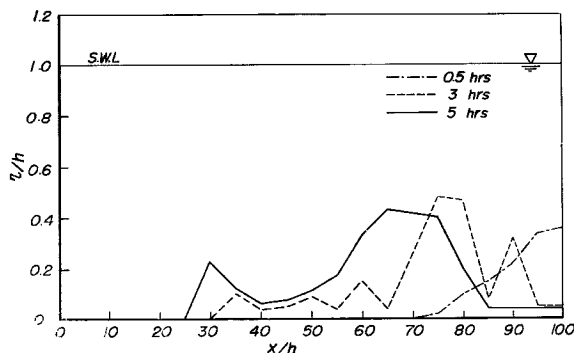


Fig. 15 Experimental results of deposit profile in the case of C-1

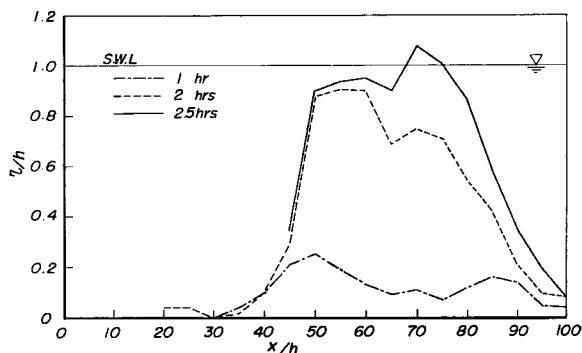


Fig. 16 Experimental results of deposit profile in the case of C-2

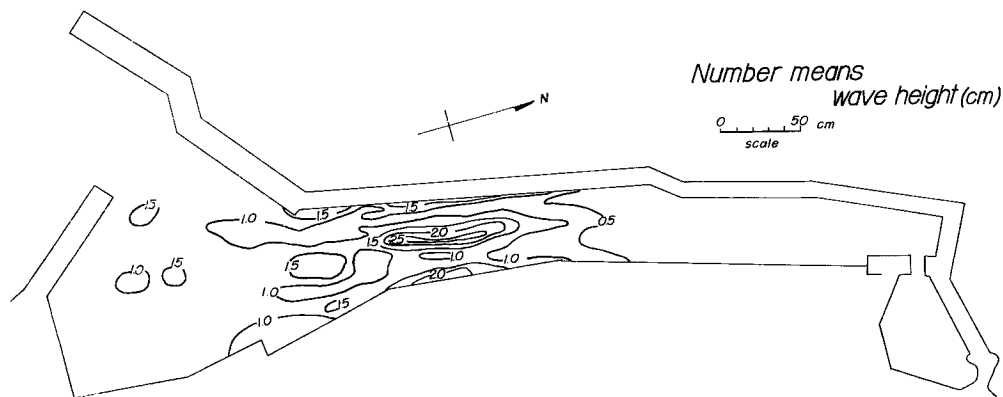


Fig. 17 Distribution of wave height in the basin (experiment C-2, fixed bed)

用することの良否も相似律の関係から検討した。前者については定性的な傾向を把握するにとどまったが、後者については塩化ビニール粒が漂砂実験の有力な手段となりうることを現地の観測資料と比較して検証できたと考える。これらに対し、その埋没防止対策は明確な結論をうるにいたっていない。それは防波堤の配

置を変えた場合、泊地内の波運動がきわめて複雑となり、かつその運動と土砂の輸送との関係を十分に把握できなかったことによると思われる。以上の実験結果から今後検討すべき問題点として2, 3を列挙するとつぎのようである。(1) 波による底質の浮遊および堆積機構に関する基礎的研究, (2) 底質輸送に対する波とか静振の効果, (3) 泊地入口における浮遊砂濃度の適確な算定, (4) 防波堤配置を変えた場合の水粒子の挙動などであって、これらについて一つ一つ慎重な考察を行ない、港湾埋没問題を解明していかなければならない。

最後に、この研究にあたって終始御指導を頂いた岩垣雄一教授に深謝の意を表するとともに実験に協力していただいた海岸災害研究室の諸氏ならびに福井県土木部河港課の諸氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 野田英明: 茅崎港の漂砂調査について, 京都大学防災研究所年報第4号, 昭36, pp. 221-236.
- 2) Diephuis, J. G. H. R. : Scale Effects Involving the Breaking of Waves, Proc. 6th Conf. on Coastal Eng., 1958, pp. 194-201.
- 3) 榎木亨: 移動床実験の現地海岸への適用に関する一考察, 第8回海岸工学講演会講演集, 昭36, pp. 134-138.
- 4) 本間仁, 堀川清司, 鹿島遼一: 波による浮遊砂に関する研究, 第11回海岸工学講演会講演集, 昭39, pp. 159-166.
- 5) 岸力, 榎国夫, 山崎貞元: 波動による底質の浮遊, 土木学会第20回年次学術講演会講演概要, 第II部, 昭40, pp. 66-1-2.
- 6) Kajiura, K. : On the Bottom Friction in an Oscillatory Current, Bulletin of the Earthquake Res. Inst., Vol. 42, 1964, pp. 147-174.
- 7) 岩垣雄一, 柿沼忠男, 宮井宏: 現地海岸における海底摩擦係数について, 第12回海岸工学講演会講演集, 昭40, pp. 35-40.
- 8) Goda, T. : A Study on the Mechanim of Transportation of Suspended Sediment and Its Application to Increasing the Efficiency of Sedimentation Basin, Memoirs of the Faculty of Eng. Kyoto Univ., Vol. 15, No. 4, 1953, pp. 253-267.
- 9) Lane, E. W. and Kalinske, A. A. : The relation of suspended to bed material in rivers, Trans. A. G. U., 1939, p. 637.
- 10) 野田英明, 井保武寿: 波による海底砂の移動限界と砂れんの発生, 第11回海岸工学講演会講演集, 昭39, pp. 153-158.