

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

Rahman Hidayat*・入江 功**・森本剣太郎***・小野 信幸****

1. ま え が き

航路や泊地などの水域施設は、船舶が必要とする時刻に入港でき、また必要とする時刻に出港できるように、常に必要な幅と水深を確保しておかねばならない。わが国の多くの港は、急流河川から排出された土砂が沿岸部に堆積し、波の作用により運ばれて、航路泊地に侵入する 경우가ほとんどであるが、広くアジア地域を見た場合、雨季に緩勾配の河川を流送された微細な土粒子が沿岸部に堆積し、これが波・流れにより航路や泊地に堆積して港の稼働率を著しく低下させる例が非常に多い。航路泊地の埋没のもとが砂の場合は、わが国でも多くの事例があり、その対策にも実績があるが、微細な土粒子の場合は、特に九州地区の港湾に事例が見られるのみで、その埋没機構についても十分わかっていない。本研究では、わが国およびアジア地域の港湾を対象に、有効なシルテーション対策のあり方について室内実験や数値計算、さらには、現地の事例にもとづき考察するものである。

2. シルテーションにおけるフルードマッドの役割

2.1 薄型水槽による実験結果

直立潜堤による埋没防止効果は、熊本港での施工事例により確認されていたが、これがどのような機構で埋没を防止しているのかについて、薄型水槽 (Slim-tank) を用いた実験により、直立潜堤を設置した場合としない場合 (対策工の有無) を対象に調べた。図-1 には、撮影されたビデオ画像の一例を示す。これは奥行き厚さ 20 cm の薄型水槽内に航路断面模型をつくり、図の右側に設けた攪拌浮遊室で一旦浮遊した底泥 (初期濃度 20 g/l) を沈降させることによりフルードマッド (厚さ $h_r=20$ cm) を作った後、ゲートを開放して 10 秒経過した後の様子である。

図-2 は、 $h_s=20$ cm の潜堤を設置しない場合と設置した場合についての航路内への底泥流入量を画像解析に

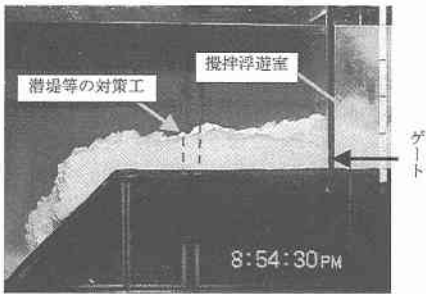


図-1 フルードマッドの航路への流入、ゲート開始後 10 秒

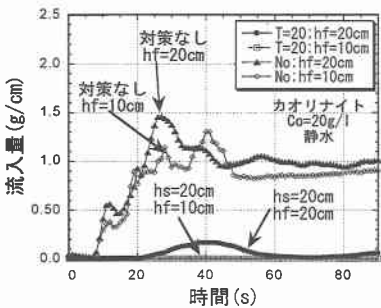


図-2 潜堤の有無に対する流入量比較

より調べた結果である。横軸は流動開始後の時間、縦軸は (g/cm) 当り流入量である。図より潜堤を設置した場合は航路への泥土の流入を大きく防止している事がわかる。実験の結果、①潜堤等の埋没対策施設はその高さ (h_s) がフルードマッドの高さ (h_r) よりも高い場合にフルードマッドの航路への流入を有効に阻止する。②フルードマッドの濃度が等しい場合、それを形成する底質が異なってもフルードマッドの流動速度に顕著な変化はみられないことなどが明らかとなった。

2.2 薄型水槽について計算結果

ここでは薄型水槽内におけるフルードマッドの挙動を再現できる数値シミュレーション法について検討した。基本的な計算法は連続の式 (1)、運動方程式 (2)、塩分濃度の保存式 (3)、状態方程式は以下のようになる。連続の式

* 学生会員 工修 九州大学大学院 工学部
** 正 会 員 工博 九州大学大学院教授 工学研究院
*** 学生会員 工修 九州大学大学院 工学部
**** 正 会 員 工修 九州大学大学院助手 工学研究院

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

運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\bar{u}B)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{u}B)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{u}wB)}{\partial z} \\ &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(B N_x \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B N_z \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \\ & \quad - \frac{g n^2}{R^{1/3}} |\bar{u}| \bar{u} \frac{\partial S}{\partial z} - B g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{B g}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} \rho dz \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

塩分濃度の保存式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\bar{c}B) + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{c}\bar{u}B) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{c}wB) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(B K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここでそれぞれの記号は t =時間, u =河道幅平均水平流速, w =河道幅平均水平流速, B =河道幅, η =水位偏差; N_x =水平粘性係数; N_z =鉛直粘性係数; g =重力加速度; n =マンニングの粗度係数; c =塩分濃度; K_x =水平拡散係数; K_z =鉛直拡散係数; S =潤辺; R =動水半径; ρ =密度である。図-3は、今回用いた数値計算モデルによる計算結果であり、いずれも計算開始後10秒の塩分濃度の等高線を示している。図中最上段は攪拌浮遊室における初期濃度5g/l, $h_f=20$ cmの場合、図中の中段は初期濃度20g/l, $h_f=20$ cmの場合を示し、フルードマッドの密度が高いほど流動到達距離が大きいことがわかる。図中下段の直立潜堤を置いた場合は初期濃度20g/l, $h_f=20$ cmであるが、直立潜堤がフルードマッドに

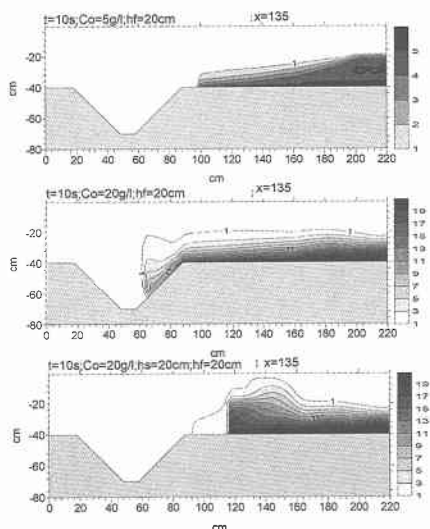


図-3 初期濃度が異なる条件(上, 中段)と潜堤を設置した条件(下段)の計算結果比較

対し極めて有効であることがわかる(Hidayat ら, 2000)。

3. 熊本港の潜堤とフルードマッド

熊本港は有明海の東岸, 白川と緑川の間の扇状地にあり, 遠浅で, 潮の干潮の差は4.5mと大きいが潮流は1ノット程度である(入江ら, 1991)。図-4には熊本港の平面図と今回の泥採取地点を示す。有明粘土層が40m程度の厚さで堆積するこの海域では, 試験掘りの結果(鶴谷ら, 1994; Kihara ら, 1994), 海底から高さ1~1.5mの潜堤タイプの逆T字堤が有効であることが確認された。そこで図-5のように, 1992年9月から1997年10月までに24回の深浅測量が建設途上のStage 3で実施された。Stage 1として, 航路泊地がT字堤, 透過堤(潜堤機能), 潜堤で囲まれた。このStageでは, 図の黒い矢印の部分は未だ開口し, 白い矢印の潜堤を越えた泥土のみが港内へ侵入する状況であった。Stage 2も泥土侵入

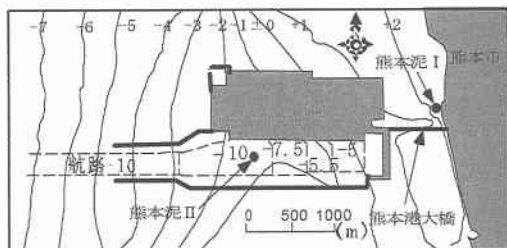


図-4 熊本港の平面図と泥採取地点

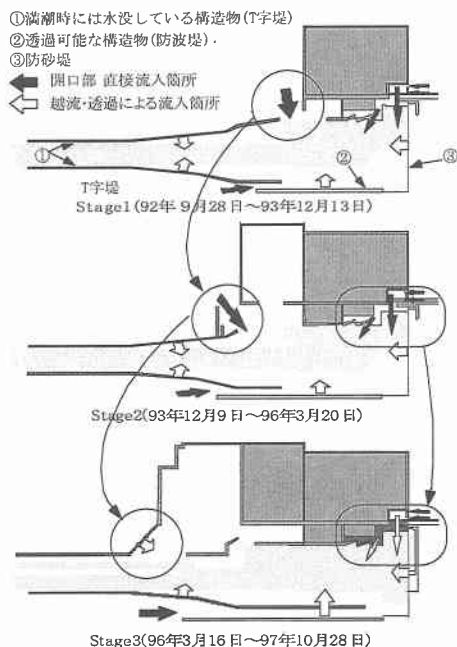


図-5 施設整備過程(Stage)の分類

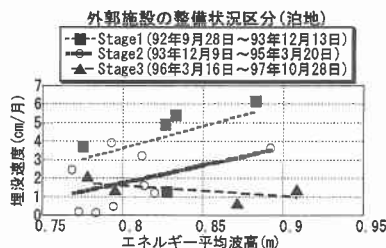


図-6 エネルギー平均波と埋没速度

条件は Stage 1 とほぼ同じ状況であった。しかし、Stage 3 では、図-5 の黒い矢印の開口部分はほぼ完全に閉じられ、潜堤を越える白い矢印の侵入のみが可能な状態となった。

図-6 は、Stage 1 から Stage 3 における航路泊地内埋没速度 (cm/月) と埋没期間での来襲するエネルギー平均波高 (m) との関係を示したものである。Stage 1, Stage 2 ではエネルギー代表波が増大するにつれ、埋没速度も増大しているが、Stage 3 では、埋没速度はエネルギー代表波に関係しなくなっている。このことは、港口を除き、港の開口部分を一切を閉じることで、潜堤の高さ以下のレベルでの泥土の侵入が防がれていることを示し、フルードマッドが埋没に大きく寄与することが、実証されている。これらのことから、潜堤等により開口部を閉め切るとは、海底近くに形成される高濃度浮遊泥の流入を防ぎ、港内の埋没防止に有効であると言える。しかし、開口部が完全に閉め切られた後の Stage 3 においても、泊地にはある一定量の埋没が常に生じている。これは、熊本港におけるシルテーションが高濃度浮遊泥層の流入以外の機構によっても生じていることを示唆するものである。

4. アジア地域におけるシルテーション問題

これまで述べたシルテーションに関する室内実験、数値計算および熊本港の現地調査結果から言えることは、以下の通りである。厚さ 20 cm の薄型水槽内によるモデル航路内へのフルードマッド流入実験に依れば、攪拌浮遊室における初期濃度が、5 g/l ~ 20 g/l の浮泥が沈降してつくられるフルードマッドは、図-1 に示したように窪みに向かってかなりの速度で流入することが観察された。底泥がシルトや粘土で構成されている海域では、荒天時における波や流れによりせん断降伏した底泥は勢いよく巻き上がり、浮遊泥層が形成されるが、この過程では顕著な埋没は発生しないものと思われる。やがて海象がおさまって来るにつれ浮遊泥は沈降し始め、上面に界面を持つフルードマッドが形成される。この場合、もし航路泊地等の掘削跡の低地があれば、フルードマッドは

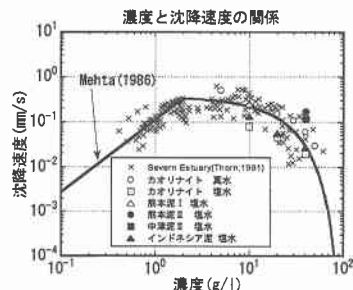


図-7 濃度と沈降速度の関係

重力の影響を受け、地形の低い方へ流下する。埋没はこのような過程で発生するものであろうが、埋没のはげしさに関係する要素として、先に述べたように、①フルードマッドの厚さ h_f に対する直立潜堤の底面からの高さ h_s の相対関係、②フルードマッドそのものの単位体積重量 C_0 などが関係するものと思われる。アジア地域におけるシルテーション問題を考えるとき、今一つ挙げられる重要な要素は、アジア地域の底泥の圧密係数が非常に小さいことである。図-7 は、今回の研究において採取した底泥の沈降試験を行った結果である。熊本港や中津港の底泥に比し、インドネシアの底泥の方が hindered settling 領域における沈降速度が遙かに小さくなっている。これは、海象が治まって形成されたフルードマッドが圧密沈下過程に入るまでの時間が長く、それだけ埋没現象が長く続くことを示しており、アジア地域における潜堤による埋没対策が逆に有効である可能性を示すものである。

5. Semen Tuban 港のシルテーション対策の事例

5.1 背景と自然条件

Semen Tuban 港は、図-8 示すようにインドネシア東ジャワ州のジャワ海に位置している。Tuban 湾沿岸域の水深は比較的浅く、泊地領域の海底勾配は非常に緩やかである。5 年確率の有義波高 (H_s) は 3.9 m、波周期は 10 s である。平均潮位は D.L. 上 1.46 m、潮流は 0.15 m/s 未満である。表-1 には Semen Tuban 港付近での波高別波高分布を示す。底泥は大部分がシルト・粘土質よりなり $d_{50} = 0.05$ mm である。1993 ~ 1997 年までは港は 10,000 DWT までのセメント運搬船が港を使用していた。これをさらに 40,000 DWT の船型まで増加させるためには、泊地 - 13.00 m、航路 - 12.00 m の水深を確保しなければならず、浚渫が必要であった。浚渫を行う際の第一の問題点は、荒天時の碎波帯が泊地域の水深 - 6 m と - 8 m 間にある事である。従って、泊地域ではシルテーションによる作用が最も大きい場所となり、浚渫しても



図-8 インドネシア SemenTuban 港設地とインドネシア泥採取地点

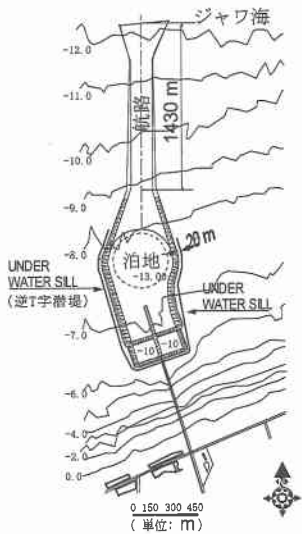


図-9 SemenTuban 港の等深線と潜堤の配置

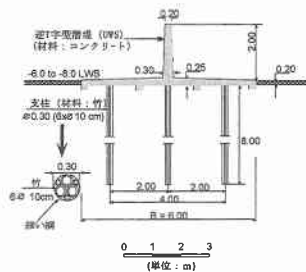


図-10 潜堤 (UWS) の断面図

港の運営が困難と思われた。第2の問題は、埋没土の浚渫維持費を最小限にするために、浚渫されたエリアをどのような保護するかであった。このために、Underwater Sill (逆 T 字型潜堤) が提案され、熊本港を前例として参考にし、採用に踏み切った。図-9 に全体のレイアウトを示した。

表-1 SemenTuban 港における 300°-60° 方向波周期分布

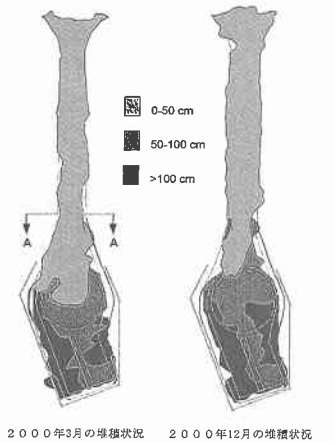
波高 (m)	波方向(北より)					中計 (%)	90°-270° 方向	全仕 (%)
	300°	330°	360°	30°	60°			
0.25-0.75	0.55	0.34	0.18	0.21	0.29	1.57	3.5	5.07
0.75-1.25	3.75	1.24	0.7	1.09	2.07	8.83	26.38	35.21
1.25-1.75	3.76	1.06	0.34	0.44	1.5	7.1	25.86	32.96
1.75-2.25	2.41	0.52	0.05	0.08	0.34	3.4	12.65	16.05
2.25-2.75	1.3	0.18	0.03	0.03	0.16	1.7	5.5	7.2
2.75-3.25	0.39	0.03	0.05	0.05	0.05	0.57	1.7	2.27
3.25-3.75	0.31	0.03	0	0	0	0.34	0.45	0.79
3.75-4.25	0.31	0	0	0	0	0.13	0.14	0.27
4.25-4.75	0.31	0	0	0	0	0.13	0.06	0.19
>4.75	0	0	0	0	0	0	0	0

5.2 Underwater Sill (UWS) の設置の有効性。

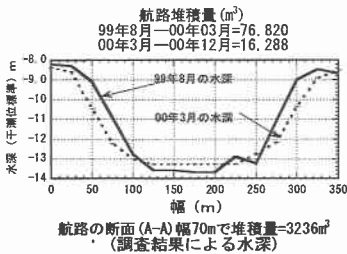
図-10 は、Semen Tuban 港で設置された潜堤の断面である。海底の地盤条件は非常に軟弱であるので、潜堤本体を竹支柱で支える必要がある。UWS のサイズは1つのセグメント当たり高さ=2.0 m および長さ=6.0 m で、のりプレートの幅は6.0 m である。泊地を囲んでいる UWS の全体長さは2400 m である。1 m 当たりの費用は Rp.4.000.000/m (約5万円/m, 2000年)。工事は2000年3月から、掘削を開始し、2000年6月には UWS の設置を開始、2000年11月に設置を完了した。この構造物により維持浚渫費を節減することが目的である。港の主な設備は長さ700 m 幅12 m のアンローダーと長さ400 m 幅41 m の岸壁である。潜堤を設置後の深浅測量結果によるとシルテーションによる堆積は、約40~50%減少しておりこれは事前の予測と似たものであった (Yuwono, 2000)。図-11 は調査結果による水深の変化である。図の左側は西モンスーン季節で潜堤を設置される前に取られたデータである。図の右側は2000年12月の東モンスーン季節のデータで、潜堤設置一ヶ月後のものである。図-12 は図-11 に示した側線に沿った海底断面の一例である。図-12 が航路の断面の一例で幅70 m、7ヶ月(99年8月-00年3月)の堆積量は3236 m³ である。但し、航路の全体的におけるその時期の堆積量は76.820 m³ であった。次の堆積量評価は2001年5月に西モンスーンの後に行なわれる。表-2 は、各領域における埋没速度を示している。

6. あとがき

本研究で得られた主要な結果は次のようである。(1) 潜堤などの埋没対策施設は高濃度浮遊泥層の流入に対して有効な防止工法である。しかし、熊本港では潜堤で航路・泊地を完全に囲んだにもかかわらず、ある程度の埋



図一11 調査結果による堆積物の高さ



図一12 航路の断面幅 70 m

表一2 領域と季節における予測と実際の堆積量高さ

時 期	地 域	堆積の高 (m)	注 目
99 年 8 月から 00 年 3 月まで	a. 航路	0.25	西モンスーン季節
	b. 泊地	0.93	
00 年 3 月から 00 年 12 月まで	a. 航路	0.05	東モンスーン季節 潜堤設置後
	b. 泊地	0.13	
99 年 8 月から 00 年 12 月まで	a. 航路	0.3	総合堆積量
	b. 泊地	1.06	

没が断続していることが、泊地の埋没は高濃度浮泥層の流入以外の機構でも生じていると考えられる。これは高濃度浮泥層の上層で浮遊している (suspension) の流入が原因と思われる。(2)熊本港の経験を受け、インドネシアの Semen Tuban 港で同様の工法が適用された。しかし、沿岸域の環境が違うので、Semen Tuban 港の潜堤の埋没対策効果は、今後も慎重に見て行くべきである。

謝辞：本研究における、資料収集に当っては、運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所、インドネシアの PT. Semen Gresik 本社と Wiratman コンサルタント (株) に御協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

入江 功・村上和男・鶴谷広一 (1991): シルテーションによる航路・泊地埋没の水理機構に関する研究, 土木学会論文集 No. 438/II-17, pp. 1-12.

鶴谷広一・村上和男・入江 功・笹嶋 博・糸井正夫 (1994): Fluid mud を考慮した三次元シルテーション予測モデルについて, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 1011-1015.

Irie, I. (1994): Engineering devices for a smooth port operation with focus on developing countries, Hidro-Port '94, Proc. It'l. Conf. on Hydro-Tech. Engg. For Port and Harbour Const., Yokosuka, Japan, pp. 43-65.

Kihara, T., H. Sasajima, K. Yoshinaga, T. Koizuka, H. Sasayama, H. Yoshinaga and T. Fujimoto (1994): Field survey on siltation-prevention effects in waterway and anchorage by submerged walls, Hydro-Port '94, Proc. It'l. Conf. on Hydro-Tech. Engg. for Port and Harbour Const., Yokosuka, Japan, pp. 1225-1242.

Hidayat, R., K. Morimoto, N. Ono and I. Irie (2000): Countermeasure against siltation through the assessment of cohesive sediment behavior, Proc. 2nd It'l. Summer Symposium, IAC-JSCE, Tokyo, Japan, pp. 141-144.

Yuwono, N. (2001): Underwater sill structure for Semen Gresik harbour at Tuban, PT. Semen Gresik (Persero), Indonesia, (notes for discussion).