

非対称没水構造物群による海底近傍の物質輸送の制御

押川英夫¹・國澤義則²・沖田翔吾³・吉田秀樹⁴
山内洋志⁵・黒田祐一⁶・藤田和夫⁷・小松利光⁸

非対称形状を有する小規模構造物を利用した底質輸送制御技術について、室内実験に基づく検討を行った。その結果、波浪と同時に潮流などの長周期の流れが存在する場に対しても本技術の有用性が確認された。また Fluid Mud による航路埋没の抑制を試みた実験からは、この種の非対称構造物を設置することにより平均で 92 % の侵入阻止効果があることが分かった。同条件における対称構造物の侵入阻止効果（遮蔽効果）は 17 % であり、それらの差によって構造物形状の非対称性により生成された残差流の侵入阻止効果を簡便に見積もると 75 % となり、本技術の効果が非常に大きいことが示唆された。

1. はじめに

著者らは波浪エネルギーの一部を利用して底質の輸送を自在に制御する BaNK (: Beach and Navigation Keeper) システムを提案している。これは非対称形状の構造物を海底に複数個設置することで、底質の輸送の任意の方向への制御を可能とするものであり、本システムを用いて航路埋没を抑制することで港湾の維持管理の中長期的なコストを大幅に軽減できることが期待されている。

本システムに関して、これまで小松ら (2001)、押川ら (2005a) 等において、室内実験や数値シミュレーション、現地試験を通じて海岸侵食の防止を主要なターゲットに研究開発が進められてきた。しかしながら、実海域においては短周期の波浪とともに長周期の潮流なども存在するため、BaNK システムを適用する際にはそれらの影響も併せて考慮する必要があるが、過去の研究では波浪による短周期の往復流のみを検討対象としてきた。そこで、本研究では潮流を想定した定常流と波浪の重合場において、BaNK システムの基本となる残差流（ここでは、オイラー的な一周期平均流速）の生成特性について実験的に検討を行った（実験Ⅰ）。

航路埋没の主要因と考えられている Fluid Mud は、粒子濃度が高い場合非ニュートン流体的な挙動を示すことが知られている (Whitehouse ら, 2000)。押川ら (2005b) は、航路埋没の要因となるような特に流動性の高い状態では、近似的にニュートン流体として取り扱う

ことが可能と考え、基礎実験として塩水を用いた密度流実験により、Fluid Mud による航路埋没に対する本システムの抑制効果を検討している。次なる展開として、本研究では物性の異なる塩水を用いるのではなく、微細粒子を用いて Fluid Mud を水槽内に再現することで、BaNK システムの航路埋没防止効果を実験的に検討した（実験Ⅱ）。

2. 定常流と波浪の重合場における残差流の特性

(1) 実験方法

実験Ⅰには図-1 に示す全長 1,600 cm, 幅 25 cm, 高さ 60 cm の鉛直 2 次元吸取式造波水槽を用いた。非対称構造物としては円柱を縦に 2 等分した半円柱を用いた。構造物の直径は 3.0 cm, 高さは 1.5 cm であり、中心間隔 6.0 cm で縦断方向に 11 列、横断方向に 4 列の計 44 個を等方格子状に配置した。また比較用に縦断方向に 15 列、横断方向に 4 列の計 60 個を設置した場合、更に縦断方向 15 列の内の中央の 5 列を間引いた計 40 個の場合についても実験を行っている。造波機で波を起こすのと同時にポンプ(図-1 参照)で定常流を発生させ、構造物設置領域付近の流速を 3 次元超音波式流速計により計測した。定常流の大きさとしては、波浪のみの場合に底面付近に生成された水平方向の残差流の値をもとに、それを打ち消す方向の流れとして同程度および 2 倍程度の流速値とした。一様水深部における静水深を 30.0 cm として、沖波波高 5.0 cm, 周期 1.0 s の規則的な進行波を造波した。流速の測定断面は構造物の設置位置の沖側端を原点とするデカルト座標系において、構造物が 44 個の場合、縦断方向に $x=3.75, 15.75, 27.75, 39.75, 51.75, 63.75$ (cm) の 6 断面 (60 個および間引いた 40 個の場合, 75.75, 87.75 を加えた 8 断面)、横断方向には水路中央を $y=0$ として $y=0, 1.5, 3.0$ (cm) の 3 断面、鉛直方向には水路床を $z=0$ として 0.1, 0.375, 0.75, 1.5, 2.25, 3.0, 4.0, 5.0, 7.0, 10.0, 15.0, 20.0 (cm) の 12 断面とした。各測点ごとに得られた 100 波分の流速の時系列データを平均することで、底質輸送制御効果の指標となる残差流を求めた。

1 正会員 博(工) 九州大学助手 大学院工学研究院環境都市部門
2 正会員 修(工) 戸田建設(株)
3 九州大学工学部地球環境工学科
4 正会員 工修 国土交通省下関港湾空港技術調査事務所所長
5 正会員 修(工) 国土交通省九州地方整備局佐賀河川総合開発工事事務所調査設計課長
6 国土交通省九州地方整備局関門航路事務所企画調整課企画調整第一係長
7 正会員 九州大学技官 大学院工学府海洋システム工学専攻
8 フェロー 工博 九州大学教授 大学院工学研究院環境都市部門

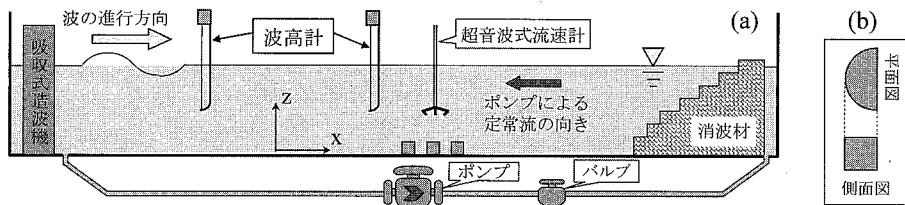


図-1 実験Iで用いた装置の概略 [左図 (a) : 装置全体の側面図, 右図 (b) : 半円柱型構造物単体の向き]

(2) 実験結果および考察

図-2～図-4に各条件下における残差流ベクトルの分布を示す。図-2は構造物を縦断方向に11列設置した場合、図-3は構造物を15列設置した場合、図-4は図-3の中央の構造物の5列分を間引いて残り10列だけを設置した場合である。各々の(a)は波浪のみ、(b), (c)は波浪にそれぞれ断面平均流速で約1 cm/s, 約2 cm/sの定常流を付加した場合である。なお、これらのベクトルは横断方向3断面の平均値である。図中の□は構造物、太矢印はポンプで発生させた定常流の方向とその大きさ(断面平均流速)を意味している。

まず基本場として定常流がない波のみの場合の残差流の分布について検討した。図-2(a)より底面付近の $z=0.1\sim5.0$ (cm) 付近に x 方向の正(岸向き)の残差流が生じていることが分かる。一方、 $z=7.0$ (cm) から中層にかけては構造物によって生じた底面付近の残差流、ならびに波の進行方向に生じる表層付近の強い残差流(ここでは計測器の制約から測定されていない)の補償流として負(沖向き)の残差流が生じている。図-3(a)の敷設領域が長い場合、図-4(a)の敷設領域が短い場合(図-2の約半分の敷設長の領域が間を置いて2領域ある条件に相当)についても、残差流の分布は図-2(a)とほぼ同様で、底面付近には正の残差流、底層上部から中層にかけては負の残差流が生じている。以上より波浪のみの場合には、半円柱型の構造物設置に伴う底面付近の岸向きの残差流の生成厚は構造物の高さの3倍程度であることが分かった。

次に、波浪と非対称構造物の効果によって底面付近に生じる残差流が、それと逆行する定常流によってどのような影響を受けるのかを評価することでBaNKシステムの効果に及ぼす潮流の影響を検討する。図-2をみると、定常流(絶対値)が大きくなるに伴って、 $z=4.0$ cm付近から中層にかけては負の方向の残差流が強くなっていることが分かる。また、底面付近についても沖側の4測線に関しては、定常流が大きくなるにつれて正の残差流が減少している。一方、岸側の2測線の底面付近では逆行する定常流が存在していても強い正の残差流が生じており、定常流の大きさが本来の残差流を線形的に打ち消す程度に大きくなっても残差流の大きさは殆ど変

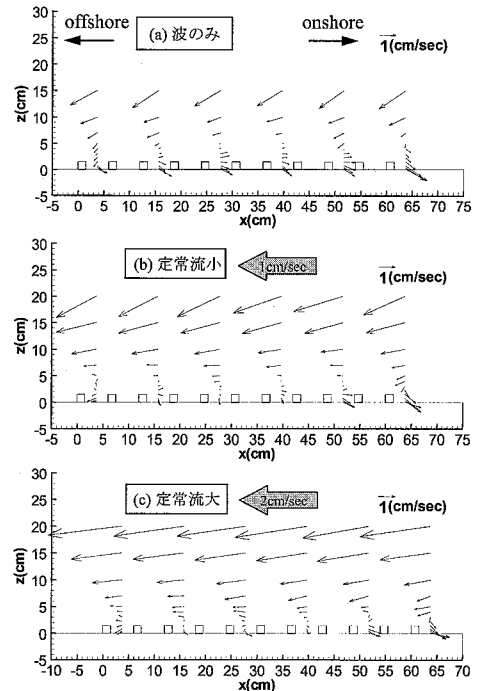


図-2 縦断方向に11列の場合の残差流のベクトル図
(波のみの条件では、 z 方向の測定位置は15.0cmまで)

化せずその影響は小さいことがわかる。この点は図-3の構造物の設置領域が長い場合、図-4の短い場合についても同様であり、岸側の2測線の底面付近では(間引いた場合の沖合側のユニットの岸側である $x=28$ cm付近も含めて)正の残差流が維持されている。これより、BaNKシステムでは底面付近の岸側に生成される正の残差流の発達に要する構造物の敷設長は長くを必要としないこと、またその残差流の大きさは定常流の有無と大小に殆ど影響されないことが理解される。つまり、BaNKシステムでは逆行する定常流がある場合、岸向きの残差流が生成されるのはBaNKブロックの岸側の一部の範囲に限られるが、その範囲においては逆向きの定常流があっても所定の残差流を生成できることになる。従って、潮流や恒流が併存する波浪場においてもBaNKシステムを適用できる可能性は高いと言える。次の段階として最適或いは十分な敷設長の検討が重要と考えられる。類

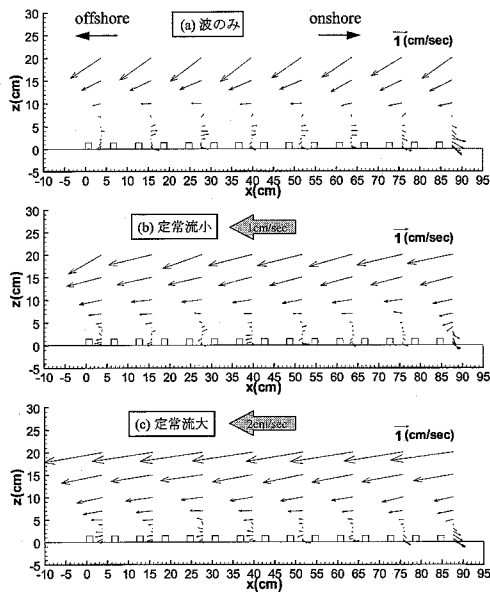


図-3 残差流のベクトル図 (縦断方向に15列の場合)

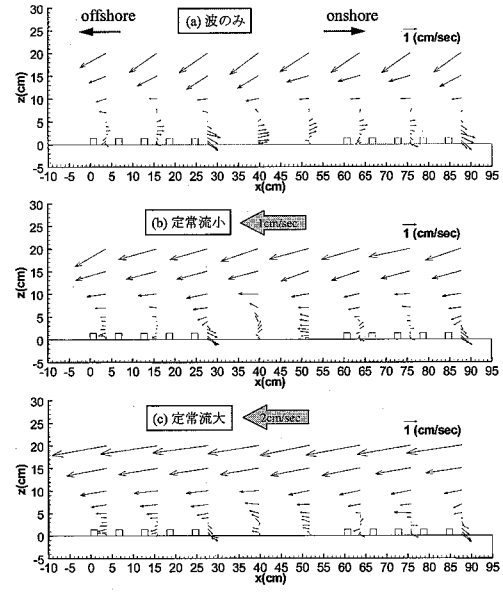


図-4 残差流のベクトル図 (図-3を5列間引いた場合)

似の原理を用いた One-Way Pipe の川野ら (2006) の研究から、 $1/4$ 波長程度以下の敷設長が必要との報告もあるが、今後の検討課題となっている。

3. Fluid Mud による航路埋没の防止 (実験Ⅱ)

(1) 実験方法

実験には図-5に示す2次元吸収式造波水槽を用い、予め一定の濃度で作られた濁水を造波水槽内に定常的に供給して、水槽内に航路を模して作成された固定床の落ち込み部への Fluid Mud の侵入を構造物により制御した。構造物には比較用の対称構造物として円柱、非対称構造物 (BaNK ブロック) として半円柱を用いた。構造物直径 $D=3.0$ cm, 高さ $k=3.0$ cm で、構造物の中心間隔 $s=6.0$ cm として等方格子状に配置した。なお、半円柱は残差流が航路から外に向かって岸向き (図-5の消波材側) に生成されるように設置した。構造物は岸沖方向に11列、横断方向に4列を配置した。規則的な進行波を対象として、表-1に示された条件で実験を行った。 H は沖側の一様水深部の波高である。図-5中の $h (=30$ cm) は航路 (勾配15度) の両肩の一様水深部の静水深であり、10 cm 底上げされているため造波機付近の沖側の一様水深部の静水深 h_0 は40 cm である。

Fluid Mud は $d_{50}=45 \mu\text{m}$ のカオリン粒子を用いて作製し、カオリンの濃度 C (%) は濁度計を用いて測定した。Fluid Mud の濃度の縦断方向の測定位置は図-5内に示されている。濁度計は6本 (T1~T6) を用い、T1~T6における測定位置の底面からの高さはそれぞれ8 mm (T1は水平方向の基準位置)、8 mm (T2は構造

物群直前の底面付近)、98 mm (T3は構造物群直前の中層付近)、8 mm (T4は構造物群直後の底面付近)、8 mm (T5は航路中央の底面付近)、100 mm (T6は航路中央の上端付近) である。予め作られた濁水の初期濃度は $C_0=5\%$ であり、実験時にはヘッドタンクを通して濃度 C_0 の濁水を水路床の (横断方向の) 中央に連続供給している (噴出孔の径は2 mm)。タンク内の濁水が $1,000 \text{ cm}^3$ 減る (約2分50秒) ごとに、同量の濁水をタンクに補給する作業を繰り返した。造波水槽は閉鎖系であるため、濁水の供給に伴う平均水位の上昇を抑えるために、水槽端部の消波材の背後 (排水部、図-5参照) から、ヘッドタンクへ濁水を供給する際に同量の水を排水した。濁水の供給に伴うヘッド差の変化は1割程度なので供給量の時間的な変化は小さいものと考えられる。各実験ケースにおける濁水供給の継続時間は、航路が濁水で満たされるまでの35分程度である。

実海域における Fluid Mud の把握が不十分なため、本実験において相似率を正確に考慮することは困難である。そこで押川ら (2005b) に倣い、主要なパラメータを概算によって評価することである程度の現象の相似性を確保することを試みている。Fluid Mud が周囲流体より重たい流体塊として近似できるものとすれば、潮流の影響を無視した場合、Fluid Mud の挙動に支配的な無次元パラメータとして、 R_i 数 ($R_i \equiv \varepsilon g h_2 / \Delta u^2$) と R_{ie}^* 数 ($R_{ie}^* \equiv \varepsilon g Q_s / B U_0^3$) が考えられる。 ε は相対密度差、 g は重力加速度、 h_2 は下層 (Fluid Mud) の厚さ、 B は水槽幅、上下層の速度差 Δu は上層速度 ($=0$) と下層速度 U_s の差である。また U_0 は、底層部の代表高さとして構造物の高さ k の位置に

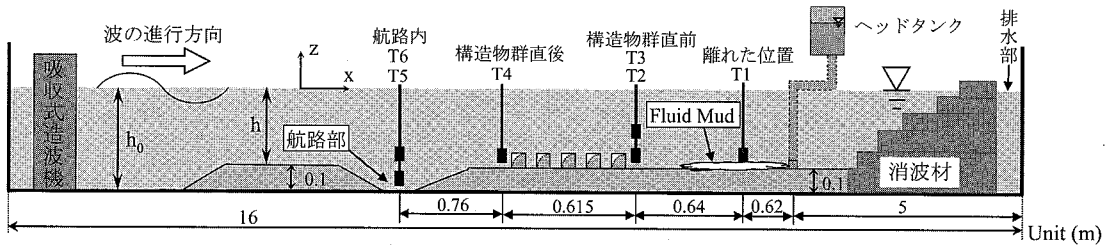


図-5 実験装置の概略 (実験Ⅱ)

表-1 実験条件 (括弧内の数値は仮想的に構造物があったとした場合, 実験Ⅱ)

実験Ⅱ	Case1A	Case1B	Case1C	Case2A	Case2B	Case2C	Case3A	Case3B	Case3C
沖波波高: H (cm)	波なし	波なし	波なし	2.0	2.0	2.0	3.0	3.0	3.0
周期: T (s)	—	—	—	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
R_t 数	14	14	14	14	14	14	14	14	14
R_{ie}^* 数	—	—	—	0.083	0.083	0.083	0.024	0.024	0.024
R_e 数	—	—	—	(1030)	1030	1030	(1550)	1550	1550
KC 数	—	—	—	(1.1)	1.1	1.1	(1.7)	1.7	1.7
k/h_2	(1.3)	1.3	1.3	(1.3)	1.3	1.3	(1.3)	1.3	1.3
構造物	なし	円柱	半円柱	なし	円柱	半円柱	なし	円柱	半円柱

おける波の流速振幅である。εおよび浮力のインプットとなる濁水流量 Q_s は、押川ら (2005b) の実験では塩水の供給濃度および供給流量で評価することがほぼ可能であったが、本実験では混合と連行および土粒子の沈降・堆積により、濁水の濃度および流量が縦断方向に大きく変化する。ここでは、波および構造物がない場合 (Case1A) の結果を用いて、εには T4 の位置において濁水濃度がほぼ一定となった際の濃度を用いるとともに、T2 から T4 間の Fluid Mud の平均移動速度を U_s として、 U_s と T2, T4 における下層の平均厚 h_2 から求めた層平均の断面通過流量 Bh_2U_s により、 R_{ie}^* における Q_s を評価した。当然ながら構造物の大きさも主要な因子となるため、 KC 数 ($\equiv U_0 T/D$) や R_e 数 ($\equiv U_0 D/\nu$)、相対的な構造物の高さ ($\equiv k/h_2$) なども重要となる (T は波の周期、 ν は動粘性係数)。押川ら (2005b) の概算によると、航路埋没の問題が顕在化している熊本港では有義波高 1~1.39 m の代表波浪に対し、 $R_t=17$, $R_{ie}^*=0.27\sim0.74$, $KC=1.7\sim2.3$, $R_e=1.7\times10^5\sim2.4\times10^5$, $k/h_2=3$ となる。したがって表-1 から理解されるように、室内実験においては一致させることが困難な R_e 数を除いて、主要なパラメータと考えられる R_t 数、 R_{ie}^* 数、 KC 数および k/h_2 については、 R_{ie}^* 数がやや小さいものの実験と現地スケールでオーダ的にはほぼ一致している。

(2) 実験結果および考察

実験結果の例として濁度計を設置した代表位置 T2, T4, T5 の濁水濃度の時系列をそれぞれ図-6, 図-7, 図-8 に示す。ただし各ケースの時系列では、濁水層の先端が T1 の位置を通過した時刻を 0 としている。

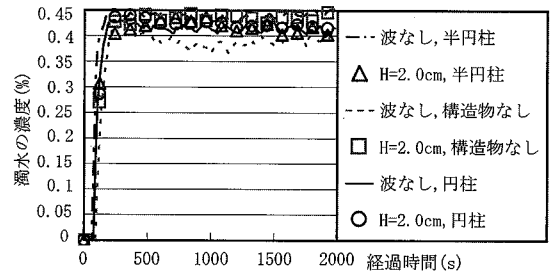


図-6 構造物群直前の位置での濁水濃度の時系列 (T2)

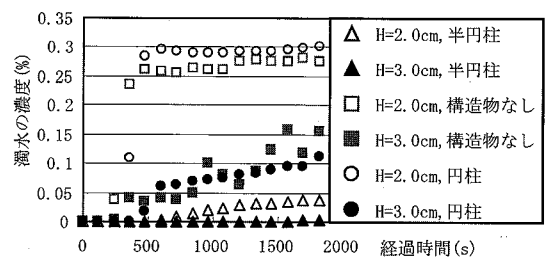


図-7 構造物群通過直後の濁水濃度の時系列 (T4)

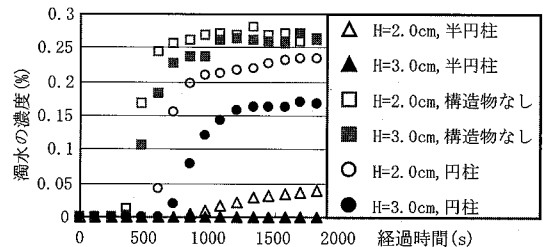


図-8 航路内底面付近の濁水濃度の時系列 (T5)

構造物なしと対称な円柱の場合を比較することで、構造物が設置されたことによる効果（遮蔽効果）を検討する。構造物群直前の図-6 からわかるように、ほぼ一定になった際の濁水濃度（ $\equiv C_{\infty}$ ）は全ての条件でほぼ等しくなっていることから、構造物の設置による遮蔽効果自体はそれ程大きくないことが分かる。

波浪場に構造物を設置した場合を見ると、構造物群通過後の図-7、図-8 において、BaNK ブロックを設置した場合の濃度は、構造物なしや対称な円柱を設置した場合に比べて著しく減少していることがわかる。また、各ケースの実験後（波を止めた後）にそのまま放置して濁水の沈降・堆積状況を観察した結果、半円柱では他の条件と比較して、構造物群への侵入前の位置（例えば、T1 付近）において、明らかにカオリン粒子の堆積が多かった。これは、構造物群設置領域への底質の侵入が抑制されてこの位置での濁水の滞留時間が長くなって粒子が沈降したためであり、この点からも構造物形状の非対称性の効果（BaNK システムの効果）により濁水の侵入が抑制されていることが理解される。

次に $H=2.0\text{ cm}$ と 3.0 cm の場合を比較することで、波高による BaNK システムの効果の差異について検討する。 $H=3.0\text{ cm}$ では半円柱を設置した場合の構造物群通過後（T4, T5）の濁水濃度がほぼ 0 となっており、今回の条件下では波高が大きい方が侵入の抑制効果は大きい。実験時の目視によると、波高が大きい 3.0 cm の場合の濁水はかなり巻き上がっていた。これより、波高の変化に伴い R_{ie}^* が変化することで、Fluid Mud の状態（ここでは安定性）および残差流の強さが異なっていたと推察される。

押川ら（2005b）に倣い、各ケースのほぼ定常になった際の濃度（ $\equiv C_{\infty}$ ）を用いて航路埋没防止効果の簡便な定量評価を行った。Fluid Mud の構造物群設置領域通過後の T4~T6 と 2 種類の波高の場合の平均値を用いて、構造物群設置による Fluid Mud の航路への侵入阻止率を求めた。即ち、構造物が設置された場合について、構造物が無い場合の C_{∞} （ $\equiv C_{\infty A}$ ）と各ケースの C_{∞} との差を $C_{\infty A}$ で除した値により、Fluid Mud の航路への侵入阻止率を評価した。その結果を表-2 に示す。これより構造物群設置による Fluid Mud の航路への侵入阻止率は、対称な円柱の阻止率が平均で 17% であるのに対し、非対称な半円柱の阻止率は 92% となっており、それらの差により構造物形状の非対称性の効果（BaNK システムの効果）を簡便に評価すると 75% と非常に大きいことが分かる。このような結果は、押川ら（2005b）の結果と定性的には一致しているものの、非対称構造物の効果は本実験の方がかなり大きくなってい

表-2 構造物群による侵入阻止率（%, T4~T6 の平均）

実験Ⅱ	円柱	半円柱	半円柱と円柱の差
Case1: 波なし	15	7	-8
Case2: $H=2.0\text{ cm}$	5.0	85	80
Case3: $H=3.0\text{ cm}$	28	98	70
Case2 と Case3 の平均	17	92	75

る。実験方法が異なる上、実験条件もそれ程多くはないために明確な理由の説明は現時点では困難であるが、本実験の R_{ie}^* がやや小さいために、比較的混合が生じ易くなっていたことが影響しているものと考えられる。

4. おわりに

本研究により、以下の知見を得た。

1) 潮流などの長周期流れが存在する場でも BaNK システムの有用性が確認された。逆向きの定常流が強い場合は、本来の残差流の生成は BaNK ブロック敷設領域の末端部に限定されるため底質の輸送を推進することは容易ではないが、残差流の方向とは逆向きの底質の移動をくい止める働きは十分に期待できる。

2) 潮流などの長周期の流れ（或いは、定常流）の有無や大小に拘らず、残差流の縦断方向の発達に必要な構造物の敷設長は比較的短い。従って、実海域で本システムを適用する際には、数個の非対称な突起を有するユニット型式の BaNK ブロックを適当な間隔で設置することが有効である。

3) 半円柱型の BaNK ブロックの設置により、連続供給された Fluid Mud の航路への侵入が平均で 92% 抑制された。一方、対称形状の円柱の阻止率は 17% で、それらの差により構造物形状の非対称性による効果（残差流の効果）を簡便に見積もると 75% となり、BaNK システムの効果が非常に大きいことが示唆された。

参 考 文 献

- 押川英夫・張信一郎・鞠承洪・小松利光(2005a): 地行浜における BaNK システムの現地試験, 水工学論文集, 第 49 巻, pp. 1309-1314.
- 押川英夫・國澤義則・吉田秀樹・谷川晴一・黒田祐一・藤田和夫・小松利光(2005b): 非対称没水構造物を用いた航路埋没防止技術に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 486-490.
- 川野立・Mukhsan Putra Hatta・藤田和夫・松田如水・押川英夫・小松利光(2006): 波浪場における方向抵抗差を有する管路の残差流特性, 水工学論文集, 第 50 巻, pp. 1435-1440.
- 小松利光・齋田倫範・小橋乃子・安達貴浩・柴田卓也(2001): 方向抵抗特性をもつ海底小規模構造物を用いた海底近傍の物質輸送の制御, 水工学論文集, 第 45 巻, pp. 1087-1092.
- Whitehouse, R. R. Soulsby, W. Roberts and H. Mitchener(2000): Dynamics of Estuarine Muds, Thomas Telford, 210p.