

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

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*****

非対称形状を有する小規模構造物を利用した航路埋没防止技術について、室内実験に基づいた検討を行った。Fluid Mud による航路埋没の防止を意図した密度流実験からは、この種の非対称構造物を設置することにより平均で38%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15%であり、構造物形状の非対称性による侵入阻止効果は23%である。底質が砂の場合を意図した移動床制御実験では、航路の肩付近に堆積した底質の航路内への侵入が90%程度抑制されており、航路への土砂の堆積の大幅な削減が可能となることが示唆された。

1. はじめに

著者らは底質の輸送に起因した諸問題への対応策として、BaNK (Beach and Navigation Keeper) システムを提案している (小松ら 2001, 2002, 押川ら 2004a, 2004b, 2005)。BaNK システムとは波浪による往復流場に非対称構造物を設置して底層付近に一周期平均的な流れ（以下では、波浪残差流と呼ぶ）を任意の方向に生成させることにより、底質移動の自在な制御を可能とするものである。本システムに関して、これまで小松ら (2001, 2002)、押川ら (2005) 等において、海岸侵食の防止を主要なターゲットに水槽実験および現地試験を通じて研究開発が進められてきた。次なる展開として、著者らは航路埋没の防止にターゲットを定め、まずは基礎研究として室内実験に基づく検討を行った。

非対称構造物により底質輸送を制御するという、本研究に類似した研究としては小田ら (1991)、入江ら (1992)、仲座ら (1995)、小野ら (2003) などが挙げられる。しかしながら、航路埋没防止に関する検討は入江ら (1992)、小野ら (2003) に見られる程度であり、本システムを用いた航路埋没防止技術を実用化するための基本的な知見が、既存の研究によって十分に蓄積されているとは言い難い。

2. Fluid Mud による航路埋没の防止 (実験 I)

(1) 実験方法

九州では熊本港に代表されるようにシルトや粘土による航路埋没が顕著であり、この埋没現象の主要因と考えられている Fluid Mud の制御は重要な課題と考えられ

る。しかしながら、現地における Fluid Mud の状態や挙動については未だ不明な点も多く、今後の研究に期待されるところが大きい。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が (例えば、中川ら, 2004)、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、近似的にはニュートン流体として取り扱うことが可能と考えられる。その場合、更に簡単化すれば Fluid Mud は重たい流体塊と捉えられるので、まずは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効果を検討した (実験 I)。染料 (ウランin) により着色された塩水で Fluid Mud を模擬し、造波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塩水の侵入を構造物により制御する。

実験には図-1 に示す 2 次元吸収式造波水槽を用いた。本実験では横断方向の 2 次元性の確保を容易にするため、水槽の一部において厚さ 2 mm の薄板を用いて水槽幅 25 cm を中央で仕切り、テストセクションの水路幅 B を 12.4 cm とした。構造物には比較用の対称構造物として円柱型、非対称構造物として投影面積が同じ半円柱型を用いた。構造物の中心間隔 s ($= 3.8$ cm) と構造物直径 D ($= 1.5$ cm) の関係は押川ら (2004a) を参考に波の進行・横断方向ともに $s/D = 2.5$ で一定とし、半円柱型構造物は波浪残差流が航路から沖向きに生成されるように設置された。構造物の高さ k は押川ら (2004b) 等を考慮して、構造物直径と同一 ($k = D$) とした。構造物の敷設長は岸沖方向に 30 cm で 8 列とし、横断方向には 3 列とした。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が行われた。 h ($= 30$ cm) は航路 (勾配 15 度) の両肩の一樣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樣水深部の静水深 h_0 は 40 cm である。 H_0 は沖側の一樣水深部での波高である。Fluid Mud の密度に相当する塩分濃度 C (%) は導電率計 (以後、塩分計と呼ぶ) を用いて測定した。塩分濃度の縦断方向の測定位置は図-1 内に概説されている。塩分計は 5 本 (S-1~S-5) 用い、S-1~S-5

* 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

** 学生会員 九州大学大学院工学府 海洋システム工学専攻

*** 正会員 国土交通省下関港湾空港技術調査事務所 所長

**** 正会員 国土交通省港湾局海岸・防災課専門官

***** 国土交通省下関港湾空港技術調査事務所技術開発課係長

***** 正会員 九州大学教官 大学院工学研究院環境都市部門

***** 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

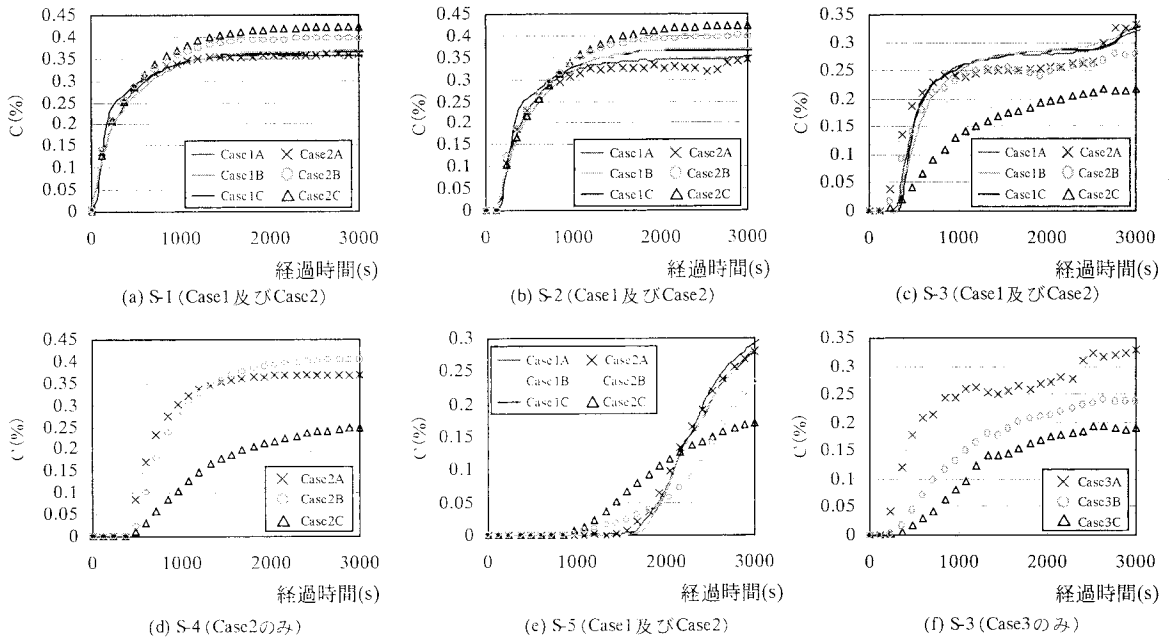


図-2 測定位置毎の塩分濃度の時系列 (実験 I)

困難なため、同海域において Fluid Mud の挙動を数値的に再現した鶴谷ら (1994) の計算結果を参考に、概略値として $U_s = 10 \text{ cm/s}$ とする。実スケールの非対称構造物として高さ 30 cm, 直径 60 cm の半円筒を考える。構造物の高さにおける波浪による流速振幅 U_0 の算定には、宇野木 (1993) を参考に求めた平均密度勾配のない二層の微小振幅波の解を用いた。このとき、有義波高 1 ~ 1.39 m に対し、 $R_i = 17$, $R_{ie}^* = 0.27 \sim 0.74$, $KC = 1.7 \sim 2.3$, $Re = 1.7 \times 10^5 \sim 2.4 \times 10^5$, $k/h_2 = 3$ となる。従って表-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 Re 数を除いて、主要なパラメータと考えられる R_i 数, R_{ie}^* 数, KC 数および k/h_2 については実験と現地スケールでオーダー的には一致している。因みに、塩水の供給量が時間的に変化するなどの違いはあるものの、類似の手法で航路埋没防止効果を検討した入江ら (1992) の実験は、塩分濃度が 10% と非常に高いものとなっている。彼らの実験における正確なパラメータの評価は困難であるが、相対密度差 ε が現地と同程度であるため、 R_{ie}^* 数が現地および我々の実験よりも数オーダー大きいものと考えられる。従って、彼らの実験は相対的に波の効果が弱い場合を対象としているものと考えられる。

(2) 実験結果および考察

結果の例として、代表位置の塩分濃度の時系列を図-2 に示す。但し、各ケースの時系列では塩水層が図-1 の S-1 の位置を通過した時刻を 0 としている。まず、波の

無い場合 (Case1) における構造物 (円柱および半円柱) の効果を検討する。図-2(b) から分かるように構造物設置領域への進入直前の S-2 の位置において、ほぼ一定値となった際の塩分濃度 (C_∞) は円柱ならびに半円柱と比較して構造物なしの方が小さくなっている。これは構造物の遮蔽効果 (潜堤等の効果に相当) により、塩水の一部が堰き止められていることによる。このことは、図-2(a) から分かるように構造物から離れた位置 (S-1) での C_∞ が波なしの条件では全て一致していることから理解される。しかしながら図-2(c) から分かるように、構造物通過後の S-3 ではそれらの濃度はほぼ等しくなっている。これより、波の無い場における構造物の効果 (遮蔽効果) はそれ程大きくないことが分かる。brockage-ratio に相当する s/D は 2.5 で、横断方向には 40% の占有率 (正確には水路幅 B との関係で 36.3%) と大きくはないため、顕著な遮蔽効果は生じていないものと考えられる。

一方、波浪場に構造物を設置した場合を見ると、構造物通過後の図-2(c), (d), (e), (f) において、一定となった際の塩分濃度が減少していることが分かる。特にそれらの図において円柱と半円柱を比較すると、半円柱を設置した際の塩分濃度が著しく減少している。これより、波浪場においては構造物形状の非対称性により塩水の侵入が抑制されていることが理解される。

上記の結果を定量的に評価するため、定常となった際の塩分濃度 (C_∞) をそれぞれのケース、地点において

求めた。但し、図-2(c)および(f)から分かるように航路が塩水で満たされると濃度が更に増加して2回目の定常値が現れるが、ここでは航路が満水となる前の1回目の定常値で C_{∞} を評価した。次に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_{∞} ($=C_{\infty A}$) に対する各ケースの C_{∞} の差を $C_{\infty A}$ で除した塩水の侵入阻止率 (C_{sn} , n は塩分計の設置位置に対応) を求めた。横軸を塩分の測定位置、縦軸を C_{sn} で表した結果を図-3に示す。更に、構造物設置領域通過後の測定位置3～5の平均値を用いて、構造物設置による航路への塩水の侵入阻止率をまとめたものを表-2に示す。波が無い場合をみると、位置に因らず円柱、半円柱ともに C_{sn} がほぼ0であり構造物の遮蔽効果は殆ど機能していない。一方、波がある場合の半円柱では構造物通過後の測定位置3～5において、13～45% (平均38%, 表-2 参照) もの塩水の侵入を阻止している。円柱ではCase2Bの C_{s3} , C_{s4} が負となっており、塩水の侵入量が僅かに増えているのに対し、半円柱ではCase2Cにおいても平均で30%の塩水の侵入を阻止している。Case2とCase3を踏まえると、円柱では測定位置3～5において-10～43%の侵入を抑制したことになり、平均では15% (表-2 参照) である。

押川ら (2004a, 2004b) によれば、 KC 数が小さくなるにつれて非対称構造物の効果 (波浪残差流や構造物に働く平均的な力) は大きくなることが知られている。構造物形状の非対称性の効果を簡単に半円柱と円柱の阻止率の差で評価すれば (表-2 参照), 各種無次元パラメータが異なるために単純比較は出来ないものの、その効果は KC 数の小さいCase2の方がCase3よりも大きくなっている。しかしながら、実験条件が少なくパラメータも系統だっていないため、非対称構造物の効果の各種無次元パラメータへの依存性を議論するのは今のところ困難と言えよう。

3. 砂による航路埋没の防止 (実験Ⅱ)

(1) 実験方法

本章では底質がシルトではなく砂の場合の航路埋没防止に関する実験を行った (実験Ⅱ)。実験には航路部も含めて図-1に示した2次元吸収式造波水槽を用いた (中央の仕切り板は無し)。構造物には比較用の対称形状として円筒、非対称構造物として半円筒を用い (両者の投影面は同じ)、また構造物を設置しないケースも行っている。構造物は航路の肩の平坦部に設置されており、高さ h は9.0 cm である。固定床の航路の上端部 (水路床から10 cm の位置) から同じ勾配で引き続き移動床航路を作成し、固定床航路の肩から5.0 cm の厚さまでを傾斜移動床、そのまま沖に向かって2.2 m (厚さ5.0 cm) の平坦な移動床を作成して初期状態とした。従っ

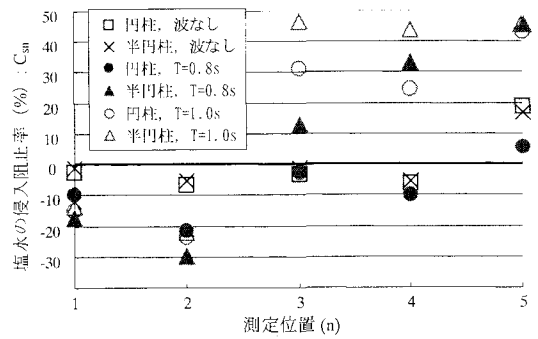


図-3 構造物設置による塩水の侵入阻止率 (実験Ⅰ)

表-2 構造物による塩水の侵入阻止率 (%、S-3, S-4, S-5)

実験Ⅰ	円柱	半円柱	半円柱と円柱の差
Case1: 波なし	3.1	3.0	-0.1
Case2: $T=0.8$ s	-2.4	30	32
Case3: $T=1.0$ s	33	45	12
Case2とCase3の平均	15	38	23

て、初期には構造物が4.0 cm 露出している。底質粒子にはメラミン樹脂 (比重1.5, 中央粒径0.2 mm) を用いた。構造物の中心間隔 s ($=8.0$ cm) と構造物直径 D ($=4.0$ cm) の関係は波の進行方向 (縦断方向)・横断方向ともに $s/D = 2.0$ で一定とし、縦断方向に8列、横断方向に3列設置した。半円筒型構造物は波浪残差流が航路から沖向きに生成されるように設置された。規則的な進行波を対象とし、周期1.2 s, 沖波波高4.0 cm, 沖の一様水深部の水深を40.0 cm とした。砂面の測定にはデジタルカメラによる撮影画像を用いた。撮影画像からの砂面データへの変換には、水槽側面から撮影された縦断方向に20枚程度の画像をGISのソフト (ESRI社製, ArcGIS) 上で繋ぎ合わせ、縦断方向に連続した砂面のデジタルデータを得た。

(2) 実験結果および考察

図-4に画像計測から得られた造波2時間後の砂面の縦断図の例を示す。参考として、想定された初期地形も併せて示されており、図中の破線で囲まれた領域は構造物設置領域である。これより、構造物が無い場合には航路の肩付近の底質が航路内へと侵入していることが分かる。従って構造物を用いたケースは、沖から航路へ侵入してくる底質を構造物で制御するものではなく、航路付近に堆積している底質が航路内に落ち込むのを制御したものである。

図-5に初期地形から造波開始2時間後までの砂面の変化量の縦断図を示す。これより全体的な底質の動きとして、構造物が無い場合と円筒の場合には底質移動が少ないにもかかわらず、半円筒が設置された場合には構造

物設置領域の後方（航路側）から構造物設置領域の沖側に底質が著しく輸送されていることが分かる。

最後に航路埋没の抑制効果の定量評価を行った。航路への底質の侵入量は、造波2時間後に $X = 960$ mm の航路の沖側端より航路側に侵入し堆積していた底質の体積で評価した。その際、底質の間隙率等は考慮していない。各ケースにおける航路への侵入量は構造物なし 411 cm^3 、円筒 598 cm^3 、半円筒 35 cm^3 となっており、半円筒の設置により侵入量が91%も減少していることが分かる。今回は底質の供給源が沖にある場合ではないため、円筒の結果が示すように構造物の遮蔽効果は機能していない。因みに円筒設置領域では砂面が顕著に波打っており（図-5参照、波長8cm、波高1.5cm程度）、峰は構造物の間、谷は構造物の位置に対応していた。構造物なしと比較して円筒の場合の侵入量が増加しているのは、縮流効果による流速振幅の増加に起因しているものと考えられる。

4. おわりに

BaNK システムを用いた航路埋没防止技術に関して基礎的な実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 連続供給された Fluid Mud による航路埋没を抑制するための実験からは、航路への高濃度層の侵入を平均で38%抑制できることが分かった。この際の対称構造物の侵入の抑制効果は15%であり、構造物の非対称性のみによる侵入抑制効果は23%となる。従って、本システムの航路埋没抑制効果は十分有意なものと考えられる。またこの実験は、河口域における塩水侵入の抑制を試みた実験と捉えることも出来る。従って、本技術は塩水侵入の抑制にも有効なものと考えられる。
- 2) 底質が砂の場合を意図した移動床制御実験から、航路付近に堆積した底質の航路内への侵入を90%程度抑制し得ることが示唆された。

参考文献

- 入江功・辻利徳・村上啓介・藤井研一・牛房幸光(1992)：歪み砂れんマットによる底層流の制御とその応用，海岸工学論文集，第39巻，pp. 476-480。
- 宇野木早苗(1993)：沿岸の海洋物理学，東海大学出版会，pp. 343-344，639-640。
- 運輸省第四港湾建設局熊本港湾空港工事事務所・(株)エコー(2000)：熊本港埋没量調査報告書，pp. 52-76。
- 押川英夫・柴多哲郎・小松利光(2004a)：非対称没水構造物による波浪残差流生成特性，水工学論文集，第48巻，pp. 1255-1260。
- 押川英夫・國澤義則・鞠承洪・小松利光(2004b)：振動流場における非対称没水構造物の抵抗特性，海岸工学論文集，第51巻，

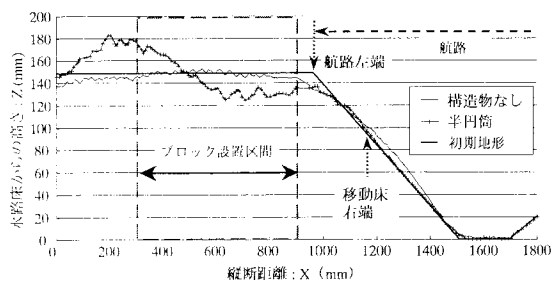


図-4 2時間造波後の砂面の縦断地形（実験Ⅰ）

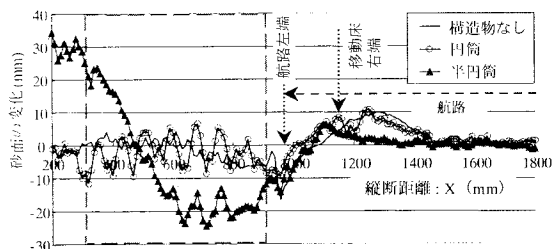


図-5 造波前後の砂面の縦断地形の変化（実験Ⅱ）

pp. 671-675.

- 押川英夫・張信一郎・鞠承洪・小松利光(2005)：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。
- 小田一紀・天野健次・小林憲一・坂田則彦(1991)：硬質型人工海藻の漂砂制御効果に関する基礎的研究，海岸工学論文集，第38巻，pp. 331-335。
- 小野信幸・入江功・迫田史顕・緒方菊(2003)：DRIM を用いた底質の分級制御に関する基礎的研究，海岸工学論文集，第50巻，pp. 606-610。
- 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。
- 小松利光・柴田卓也・押川英夫・柴多哲郎・安達貴浩・小橋乃子・植田操(2002)：BaNK システムの底質輸送制御効果に関する研究，水工学論文集，第46巻，pp. 457-462。
- 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。
- 中川康之・渡邊和重・谷川晴一・黒田祐一(2004)：海底面近傍における底泥密度の鉛直分布特性の把握，海岸工学論文集，第51巻，pp. 986-990。
- 仲座栄三・津嘉山正光・上原学・砂川恵輝・小林智尚(1995)：波動場における底面近傍定常流速の人工的コントロール，海岸工学論文集，第42巻，pp. 211-215。
- Fischer, H. B., E. J. List, R. C. Y. Koh, J. Imberger and N. H. Brooks (1979)：Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, pp. 242-248.