

歪み砂れんマットによる底層流の制御とその応用

入江 功*・辻 利徳**・村上啓介***
藤井研一****・牛房幸光*****

1. ま え が き

波の通過の下で、砂れん形状の歪みが底面に沿う正味の流れをつくりだすことは良く知られている (Inman et al., 1972). もし人工的に造った歪み砂れんマットの向きを波の進行方向に対して変えることにより、底面に沿う流向を自由に変わることができれば、航路泊地の埋没防止や底質浄化における覆砂面への底泥堆積防止など、多くの目的の漂砂対策工法として応用できるものと思われる。底面近くの流れを制御することにより、特に泥土によるフルードマッドに対し効力を発揮することが期待される。本研究は、波作用下において歪み砂れんマットがどの程度底面に沿う流れ（ここでは底層流と呼んだ）の流向を制御できるかを実験により調べ、さらにこれをシルテーションによる航路埋没対策に応用した場合の有効性を調べるものである。

2. 歪み砂れんによる底層流の制御

図-1のように歪み砂れんの向きに対して後退角 α の角度で波が進行し、ちょうど波の峰が通過する場合を考えると、水粒子は波向に沿って流速 U で流れようとし、歪み砂れんの前後に圧力差が生じる。流速 U の歪み砂れんの峰線に直角な成分を U_N 、平行な成分を U_P とすれば、 U_P は歪み砂れんが峰方向に無限に長いと仮定した場合、圧力勾配には寄与しない。 U_N は圧力勾配に寄与し、図示した方向に後流渦が発生するものと考えられる。歪み砂れん近傍ではこのような後流渦による流れが発生することを考えると、結局これは歪み砂れんの峰線と直角方向に底層流が発生する可能性を示唆している。そこで本研究では、底層流の流向、流速を見るため、歪み砂れん近傍（図-1のA点）に着色した塩水を投入し、波を作用させてその先端が移動する方向と波向とのなす角 β を調べ、 β と α の関係を調べてみた。実験は、長さ3.0m、幅1.7m、深さ0.35m、水深

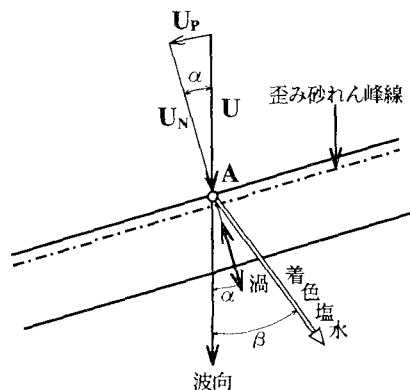


図-1 底層流制御実験の概略

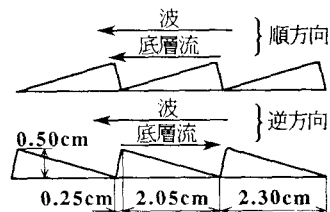


図-2 波向に対する底層流方向の定義

0.135 m の小型平面水槽で岸側に消波板を設置したもので行い、図-2 に示すような断面を有する約 1 m 四方の歪み砂れんマットを底面に敷き、波向と歪み砂れんの峰線に直角方向とのなす角 α を 10° ずつ変えながら種々の波を作用させた。ここで用いたのは周期 0.5, 0.6, 0.7 秒、波高 3.0 cm の波で、着色塩水の移動をビデオ撮影し、着色塩水の先端の移動速度および方向を画面上でトレースして調べた。この場合、図-2 に示すように、波向と底層流との方向が一致する場合を順方向、逆の場合を逆方向と呼んだ。着色塩水はシルテーションの原因となるフルードマッドを想定したもので、濃度は底面沿いの流れの様子を観察するために実際より大きめの 10% に設定し、可視化のためにアニリンブルーで着色した。図-3 は各周期における α と β との関係についての実験結果を示す。図において、円の中心から外側へ向かって β/α の値を示し、円周方向に α の値を示し

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部水工土木学科

** 学生員 九州大学大学院 工学研究科

*** 正会員 工修 九州大学助手 工学部水工土木学科

**** 神戸市港湾局計画課

***** 九州大学技官 工学部水工土木学科

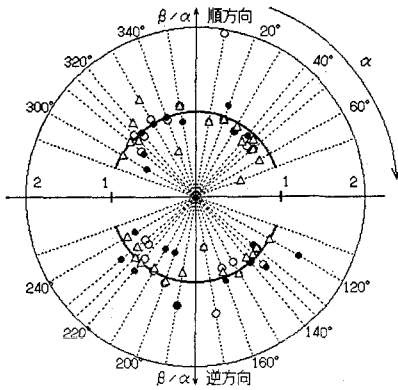


図-3 着色塩水の移動方向

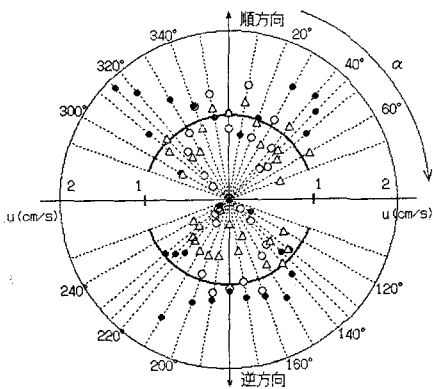
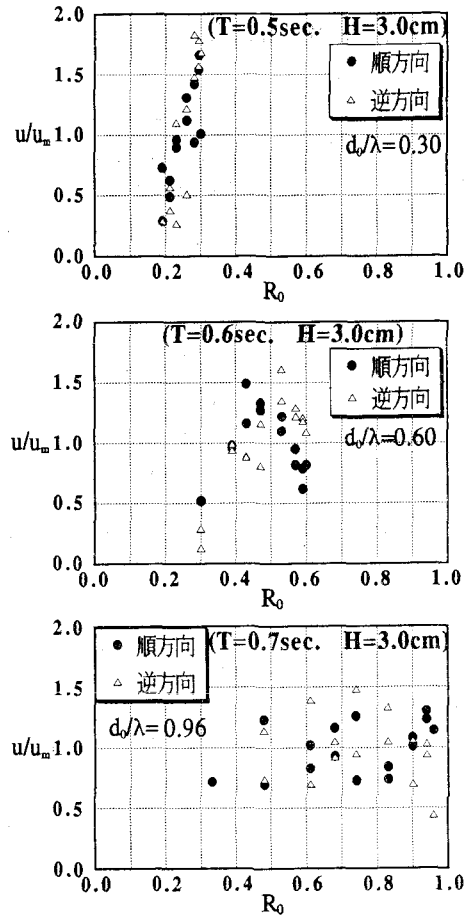


図-4 着色塩水の移動速度

ている。内側の同心円は、 $\beta/\alpha=1$ を示し、データがこの円に乗れば、波向に関係なく底層流が歪み砂れんの峰線に直角方向に流れることを示す。ここで○は周期 0.5 秒、●は 0.6 秒、△は 0.7 秒の値を示している。この図で各周期における β/α の平均値は 0.5 秒、0.6 秒、0.7 秒でそれぞれ 1.02, 0.96, 0.94 であり、また標準偏差はそれぞれ 0.24, 0.18, 0.15 であるので β/α の値は 1 付近に集中しているものと考えることができる。つまり歪み砂れんの峰線に直角方向の向きが波向に対して少なくとも $\pm 50^\circ$ であれば、底層流は歪み砂れんにより確実に制御されているものと考えられる。図-4 は各周期における α と流速の関係についての実験結果を示す。図において、円の中心から外側へ向かって着色塩水の移動速度 u の値を示し、円周方向に α の値を示している。図中の○、●、△は図-3 の場合と同じである。流向 θ を順方向では $\alpha=0^\circ$ 、逆方向では $\alpha=180^\circ$ の方向線からの偏角として底層流の方向特性を見てみる。周期 0.5 秒では順方向、逆方向共に $\theta=0^\circ$ 付近が最も流速は大きく、0.6 秒では、順方向で $\theta=40^\circ \sim 50^\circ$ 、逆方向で $\theta=30^\circ$ 付近に流速の極大値があり、0.7 秒では流速が大きく上方拡散が著しいためか傾向が不明瞭であ


 図-5 R_0 と u/u_m との関係

る。それぞれの周期で流速が最大となる角度が存在することから、水粒子軌道の全振幅 d_0 と歪み砂れんのピッチに何らかの関係があるものと思われる。水粒子軌道全振幅の歪み砂れんの峰線に直角方向の成分 $d_0 \cos \theta$ と、歪み砂れんのピッチ λ との比 $R_0 (=d_0 \cos \theta / \lambda)$ を用いて、着色塩水の移動速度 u とその全方向に対する平均値 u_m との比 (u/u_m) と R_0 との関係を波の周期別に示したのが図-5 である。グラフ上で●は順方向、△は逆方向を表す。周期 0.5 秒の場合 ($d_0/\lambda=0.3$) は順方向、逆方向共に R_0 の増大に応じて u/u_m は単調に増加する傾向を示している。これに対し、0.6 秒の場合 ($d_0/\lambda=0.6$) は順方向、逆方向共に $d_0/\lambda=0.5$ 付近で最大値を示す傾向にあるようである。また、0.7 秒の場合 ($d_0/\lambda \sim 0.9$) は R_0 の変化にかかわらず $u/u_m=1.0$ 付近を中心に分散している。このように d_0/λ の値により方向別流速制御特性が大きく異なり、その値が大きいくほど制御できる角度の幅が広がっている。

3. 航路埋没対策への応用

(1) 実験の手法

海底布設型の歪み砂れんマットは航行する船舶には支障を与えないという特徴を有している。そこでその底層流制御機能に応用した航路埋没防止効果について2次元実験により調べてみた。実験に際しては、実際に埋没防止のため用いられている潜堤(入江ら, 1991)との相対効果を検証した。航路埋没防止実験を実施するにあたり、ある程度具体的な対象地域を想定する必要がある。そこで、新北九州港の進入航路周辺を対象に水深約6m、波高0.5~1.5m、周期3.5~5.0秒の50分の1の縮尺を想定した航路模型(図-6)を製作した。これは航路と波向が直交する場合を想定しており、歪み砂れんマットを航路の沖側に逆方向、岸側には順方向となるように敷き、航路から離れる向きに底層流が発生するようにした。歪み砂れんマット自体の高さは1cm(現地換算で50cm)にしてある。

まず、図-6に示すようにフルードマッドを想定した着色塩水を航路両側のどちらか一方に溜め、波を作用させて、第1波が着色塩水を溜めている堰を通過する瞬間に堰を上げ、着色塩水が航路内に進入する様子を観察し、航路底部に設置した高さの異なる3本の塩分濃度計で航路内の各高さにおける塩分濃度の時間変化を測定した。

シルテーションによる航路埋没ではフルードマッドの流下が航路埋没に大きく寄与する。このフルードマッドの挙動を再現するために濃度10%の着色塩水を層厚1~2cm(0.5~1mの50分の1)で底面上に湛水した。実験は①何も対策工を施さない場合、②潜堤を施した場合、③歪み砂れんマットを施した場合の3つの条件において着色塩水の挙動を観察した。潜堤の諸元は潜堤が施工されている熊本新港の例にならって潜堤の底面からの高さを2cmとした。

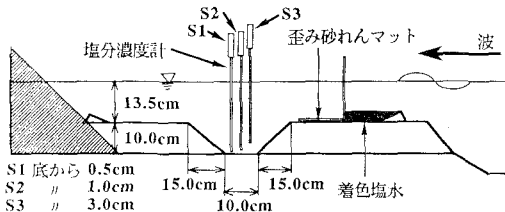


図-6 航路模型の概略

(2) 実験結果

図-7は、周期0.6秒、波高3cmの波を作用させ、沖側の着色塩水の層厚を2cmとしたときの①対策工なし、②潜堤、③歪み砂れんマットの各条件における航路底面より0.5、1.0、3.0cmの各高さでの塩分濃度の時

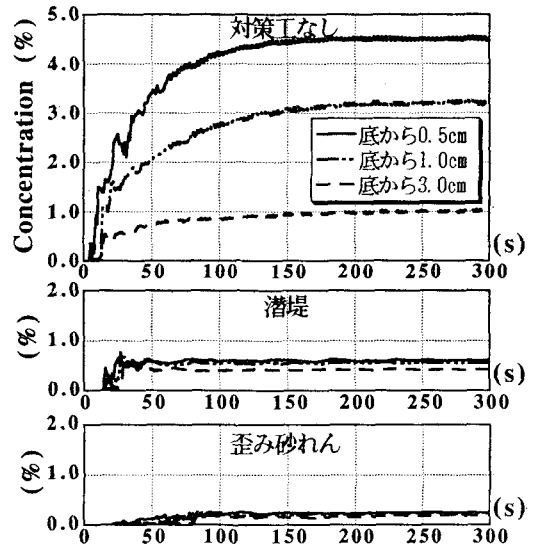


図-7 各対策工における塩分濃度の時間変化

間変化を示したものである。実験は5分間行い、グラフの横軸は堰を上げてからの時間、縦軸は航路内の各高さでの塩分濃度を表す。グラフより対策工なしの場合は、堰上げてすぐに塩分濃度が急激に増加し、約200秒後には塩分濃度は各高さで定常状態となっている。これは、堰を上げてすぐに着色塩水が航路内に大量に流れ込み、着色塩水がなくなり、供給が絶たれたためである。着色塩水の比重が大きいため航路の底部に溜まり、より底部の方が塩分濃度が高いことがわかる。潜堤使用の場合は、対策工なしの場合に比べて塩分濃度は低い、約20秒後に塩分濃度が急激に増加している。これは、第1波が潜堤上を通過した際に着色塩水の一部が潜堤を越え、拡散した状態で航路内に入り込んだものである。しかし残りの大部分は潜堤の沖側にとどまる結果、塩分の供給がなくなり、塩分濃度はすぐに定常となる。着色塩水は拡散しているため航路内の高さによる塩分濃度の違いはあまり見られない。歪み砂れんマット使用の場合は、対策工なし、潜堤に比べ塩分濃度は低いことがわかる。これは堰を上げたときに一部の舞い上がった着色塩水が航路内に進入したもので、ほとんどの着色塩水は歪み砂れんマットによって航路方面への移動を阻止されていた。

波の周期が0.5秒、0.7秒の場合もほぼ同様の傾向が見られた。また着色塩水の層厚を1cmとした場合は、潜堤、歪み砂れんマット共に高い埋没防止効果が見られた。航路の岸側に着色塩水をおいた場合についても実験を行ったが、層厚が1cmの場合は対策工の有無にかかわらず航路内の塩分濃度はゼロであった。しかしこの場合でも層厚を2cmとした場合は、対策工なしの方が大量に埋没したのに対し、歪み砂れんマットの方はほと

んど侵入しなかった。これらの実験から歪み砂れんマットが航路埋没現象に対し高い阻止効果をもつことがわかった。

図-8 は、図-7 の場合と同じ条件で、波高だけを 1 cm と低くしたときの対策工なしの場合、歪み砂れんマットの場合の塩分濃度の時間変化を表したものである。対策工なしの場合は波高 3 cm の時と同様に、5 分を経過すれば塩分濃度の変化も定常状態に近づいているが、歪み砂れんマット使用の場合は塩分濃度は次第に高くなっている。これは、波高が小さくなると歪みが砂れんマットの効果が減少することを示している。

図-9 は、波のない状態で実験を行って見たものである。着色塩水の層厚は 2 cm である。対策工なしの場合では、図-7、8 に比べ塩分濃度の増加の仕方がそれほど激しくない。5 分を経過しても、まだ増加の途中である。これに対して歪み砂れんマットの場合は、図-7、8 と塩分濃度が徐々に大きくなっている。ところが着色塩水の層厚を 1 cm にすると、マット自体の高さで着色塩水の航路内への進入は阻止される。一般にフルードマッ

ドの層厚はこれよりもずっと薄いものであり、波の静穏時にはこの歪み砂れんマット自体の堰止め効果が期待できる。

(3) 航路埋没防止効果の評価

これまでに、各対策工の航路埋没防止の効果について見てきたが、ただ塩分濃度を比較するだけでは、埋没防止効果の定量的評価は困難である。そこで本実験では対策工を施さない場合を基準とする、潜堤・歪み砂れんマットの航路埋没防止効果を埋没阻止率 (Checking Rate, r_c) で評価した。

まず 図-10 に示すように、各測定点で塩分濃度が定常状態となったときの濃度 C と、 C の半分に達するまでの到達時間 t を求め、この C に航路幅 B をかけたものをその高さでの塩分量 Q_n ($n=1\sim3$) とし、航路の底から半分の高さまでに存在する塩分量 Q を求め、この Q を t で割ったものを流入速度 q とする。この q を各対策工で求め、対策工なしの q を基準流入速度 q_0 とした。これより、 $(1-q/q_0)$ を埋没阻止率 r_c とした。 r_c の定義から対策工なしの場合はゼロであり、航路埋没防止効果が大きいほど 1 に近づく。この埋没阻止率を対策工なし、潜堤、歪み砂れんマットの各場合で求め、それを着色塩水の層厚 h_m で分けたものが 図-11 である。 $h_m=1$ cm の場合、潜堤、歪み砂れんマット共に高い埋没防止効果が得られた。潜堤は高さが 2 cm と着色塩水に比べて高いために、着色塩水は潜堤を乗り越える

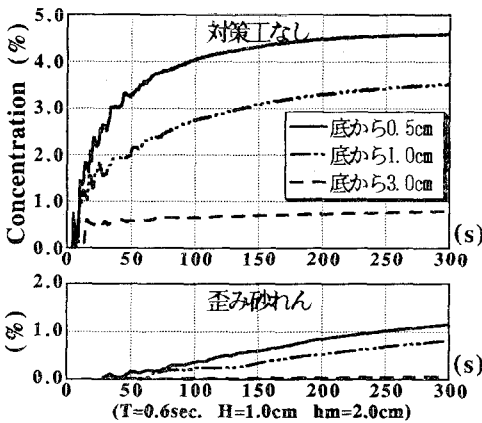


図-8 波高を低くしたときの塩分濃度の時間変化

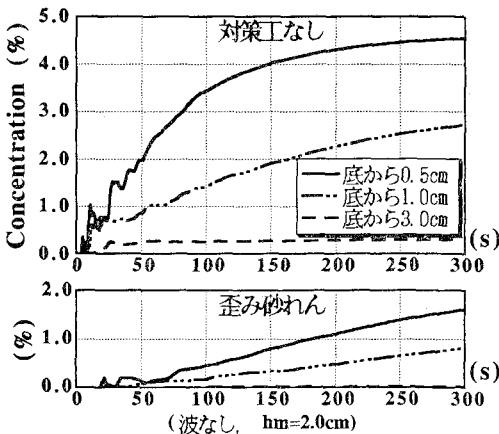


図-9 波がないときの塩分濃度の時間変化

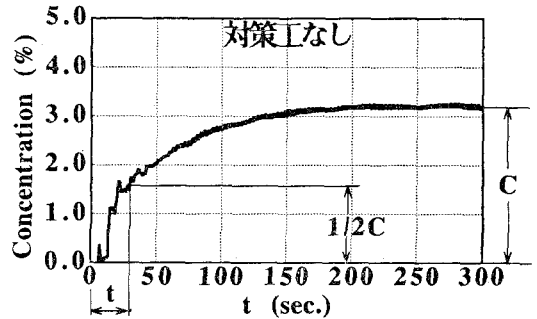


図-10 定常濃度 C と到達時間 t の定義

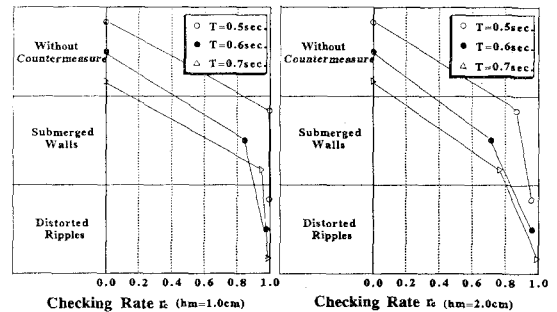


図-11 各対策工の埋没阻止率 r_c

ことができなかった。歪み砂れんマットもそれ自体の堰止め効果により、着色塩水の航路内への進入を防いだ。これに対して $h_m=2\text{cm}$ の場合は、両対策工共に防止効果は下がった。減少率を見てみると潜堤が平均 16% 減なのに対して、歪み砂れんマットは平均 2% 弱の減少にとどまった。潜堤の高さに比べ着色塩水の層厚が大きいので、着色塩水は潜堤を容易に越流し短時間に航路内に進入したが、歪み砂れんマットは着色塩水の進入を阻止し、高い埋没防止効果を得た。

実際の海では波だけでなく潮流も存在する。そこで、波と流れが同時に作用するときの歪み砂れんマットの埋没防止効果を調べた。実際は図-6 の航路模型において、ポンプで沖から岸へ向かう流れをつくり、航路の沖側に着色塩水を溜め、対策工なしの場合と歪み砂れんマットの場合と同様に実験を行った。そのときの塩分濃度の時間変化を表したのが図-12 である。対策工なしの場合は着色塩水が水路底面を這うように流れ、航路に落ちる瞬間に航路内に落ちるものと、そこで剝離し航路上部を流れていくものの2つに分かれた。流れにより着色塩水が航路内全体でかなり拡散されており、塩分濃度計がほとんど検知しない状態に陥ったので、航路底から 0.5 cm のものを 5 cm に変更した。一方歪み砂れんマ

ットでは、着色塩水がマットに達したときに、歪み砂れんにより着色塩水が舞い上げられ攪乱浮遊し、容易に沈澱しないために流れに乗って航路上を通り過ぎ、岸側へ流れていった。そのために着色塩水は航路内には進入せず、塩分濃度計もほとんど検知しなかった。実際のフルードマッドにも、このように濃度が薄くなると沈降速度が極端に小さくなる性質がある。このように潮流のような流れがある場合でも、歪み砂れんマットの航路埋没防止機能は相当に期待できるものと思われる。

4. 結 論

歪み砂れんの向きが波向に対して $\pm 50^\circ$ の範囲であれば順方向、逆方向共に底層流の流向の制御が可能であることがわかった。波の周期がさらに長くなればその制御可能な範囲は広がる傾向にある。またシルテーションによる航路埋没について対策工なし、潜堤施工、歪み砂れんマット施工の場合について実験を行った結果、歪み砂れんマット施工の場合が最も埋没速度が小さかった。

5. あとがき

本研究では、フルードの相似則を用いて実際の現象の 50 分の 1 の縮尺で実験を行ったが、スケール効果に問題があると思われ、拡散浮遊については十分に実際の現象を再現しているとは言えない。更に大きな規模での検証を必要としている。

最後に、本研究は運輸省第四港湾建設局の受託研究により、九州大学工学部水工土木学科海岸工学研究室が実施したことを付記する。

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.
- 運輸省第三港湾建設局下関調査設計事務所・九州大学工学部水工土木学科海岸工学研究室 (1992): シルテーションによる航路埋没とその対策に関する実験調査報告書, 133 p.
- Inman, D. L. and E. B. Tunstall (1972): Phase Dependent Roughness Control of Sand Movement, Proc. 13th ICCE, pp. 1155-1171.

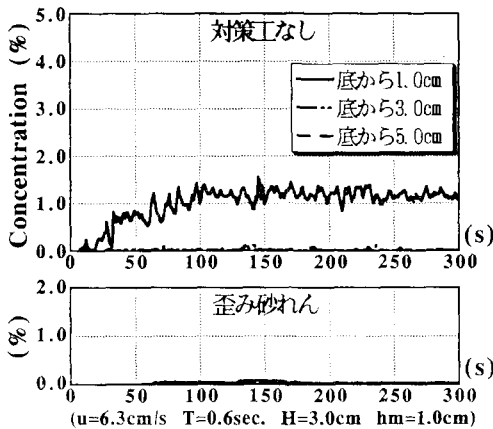


図-12 流れがある場合の塩分濃度の時間変化