

歪み砂れんマットによる沖浜帯の岸沖漂砂の制御

入江 功*・小野 信幸**・村上 啓介***
橋本 誠也****・中村 聡**

1. はじめに

白砂青松は、日本人の心の安らぎのよりどころである。水質環境、景観に配慮しつつ自然災害から砂浜や背後地を守る海岸保全工法として、最近人工リーフや潜堤が各地で施工され、その成果は着々と上げられつつある。しかしこれらの潜堤構造物は、サーフボード、ウインドサーフィンやヨット等の海洋レクリエーション活動に制約を与えてしまうことがしばしばある。ポケットビーチ独特の優美な汀線形状が損なわれることもある。もし何らかの方法で、構造物を設置することなしに豊かな砂浜を保持することができれば、海岸整備の質を格段に向上できると思われる。本研究は、歪み砂れんマットを海底に敷くことにより岸沖漂砂を制御し、人工海浜を保持することの可能性を調べるものである。歪み砂れんによる岸沖方向の底層流や漂砂の制御については、これまでもいくつかの研究がなされているが (Inman・Tunstall, 1972, 入江ら, 1992), それが有効に機能するための条件や実際の活用方法についてはあまり研究がなされていない。そこでまず歪みのある場合、ない場合を含めた固定床砂れん上での砂移動のより一般的な特性を求め、その結果にもとづいて岸沖漂砂の制御による海浜保持に関する移動床実験を実施した。

2. 固定床砂れん上の砂の移動特性

(1) 砂の移動特性に関する実験

実験には、長さ 28.0 m、幅 0.3 m、高さ 0.5 m の 2 次元造波水路を用いた。水路の中央部に中央粒径 0.16 mm の砂を砂面上水深が 27 cm となるように 3 m 区間にわたって敷き、標準的な実験波として波高 8.0 cm、周期 1.5 s の波を長時間作用させて形成される砂れん形状を求めた。次にこれを図-1 の上段に示すような正弦波形で近似し、さらにコンクリートによる製作に支障のない範囲内で可能な限り歪みを与え、同図下段に示すような歪み砂れん形状を求めた。この際歪み量は谷から上方へ

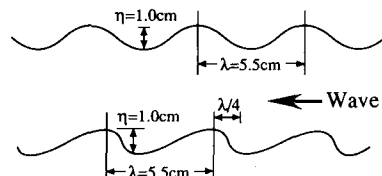


図-1 砂れん形状の図

比例的に増大させた。すなわちこれらの砂れんの波長 λ は、波に調和したものであり、以後の実験では 1.5 s を中心に、原則として ± 0.5 s だけ変動させた周期を採用している。図-1 に示す歪みなし及び歪みありの砂れん形状の固定床をコンクリートで製作し、これらを水路内長手方向に 3 m 区間にわたって敷き固定床とした。以後砂れんの谷に一定量の砂を幅方向に均等に置き、波を所定の時間作用させ、岸沖方向に分散して各砂れんの谷に落ちた砂を、砂れん毎にサイフォンノズルにより紙上に吸引取って乾燥し計量した。こうして得られた岸沖方向の砂の分布からその重心位置を求め、その重心の移動速度 V_g を砂の岸沖方向の移動速度と考えた。この場合、砂れんの谷に置く砂の量が重心の移動速度に関係するかどうかが問題となる。そこで歪みなし砂れんの場合において、2 つの谷に 60 g ずつ置いた場合と、4 つの谷に 20 g ずつ置いた場合の比較結果を図-2 に示す。一つの谷に置いた砂の量が多い方が遅れて一定速度に達しているものの、移動速度が定常化した後は両方とも同じ速度になっており、この範囲では砂の量の影響はほとんどないようである。そこで以後の実験では、4 つの谷に 20 g ずつ置くことにし、重心の移動速度が定常化した後の速度を求めることにした。重心の移動がほぼ 2 分以内で定常化した後は、相当に時間が経過しても (10 分以上) その速度は変化しないことから、定常状態に入った後は巻き上げ移動砂と沈澱砂の割合が各谷毎に一定になっているものと思われ、砂れん上にある砂全体の平均移動速度が測定されているものと考えられる。

固定床の勾配は水平床の場合と、1/15 の勾配を持つ場合を対象とした。実験結果を表-1 に示す。傾斜固定床の場合は、同表の参考図に示すような位置で測定した。表

* 正会員 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科

** 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 工学部建設都市工学科

**** 工修 福岡県庁

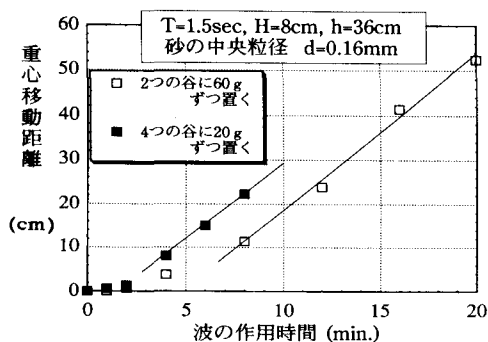
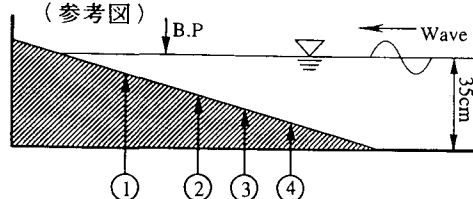


図-2 砂の量による重心移動速度への影響

表-1 固定床実験での実験条件 (抜粋)

(参考図)



実験条件: 入射波高 $H=8.0$ cm, 砂の中央粒径 $d=0.16$ mm (重心移動速度 V_g は冲向きを正とする)					
海底勾配 $\tan\beta$	砂れん形状	砂れん上水深 h (cm)	周期 T (sec.)	重心移動速度 V_g (cm/min.)	
水平床 ($\tan\beta=0$)	歪みなし 砂れん	29.0	1.5	+1.94	
			2.0	+4.30	
	歪み砂れん		1.5	-1.83	
			2.0	+0.38	
傾斜固定床 ($\tan\beta=1/15$)	歪みなし 砂れん	① 7.5	1.5	+11.18	
			2.0	-4.58	
		② 15.0	1.5	+25.54	
			2.0	+2.68	
		③ 19.5	1.5	+28.03	
			2.0	+23.66	
		④ 24.5	1.5	+12.62	
			2.0	+14.16	
	歪み砂れん	① 7.5	1.5	-2.57	
			2.0	-1.91	
		② 15.0	1.5	-11.54	
			2.0	-19.76	
		③ 19.5	1.5	-7.72	
			2.0	-8.35	
		④ 24.5	1.5	-4.67	
			2.0	-0.88	

より歪みなし砂れん上では砂の移動は冲向き、歪み砂れん上では程度の差こそあれ岸向きとなっている。実験中の観察によれば、歪みなし砂れんの場合、波の有限振幅性による波形の上下の非対称性により、波の峰が通過する場合の砂れんの岸側の後流渦が、谷が通過する場合の砂れん沖側に形成される渦より常に規模が大きく、結果として冲向きへの水塊の移動が大きくなっているため砂の移動も冲向きとなるものと思われた。一方歪み砂れんの場合は、渦の形成は沖側の方が岸側に比べて著しく大

きく、常に岸向きへの水塊の移動量が卓越していた。図-3は、水平床で周期が1.5s, 2.0sの波を作用させた場合について、電磁流速計により平均流の鉛直分布を測定した結果を示す。歪みなし砂れんでは全ての高さで冲向きであるのに対し、歪み砂れんでは底面から上方へ水深の2~3割の高さの範囲が岸向きとなっている。この範囲は砂れんの後流渦のスケールと密接な関係があるものと思われる。これらの流速分布の特性は、傾斜固定床の場合でもよく似ていた。図-4は、砂の岸沖方向の分布の時間変化を歪みなし及び歪み砂れんの場合について示したものである。X=0の位置が投入点であり、歪みなしは冲向き、歪みありは岸向きへ移動している。

(2) 砂の移動特性の定式化

固定床砂れん上の砂の岸沖移動は、砂れんの両側(岸沖方向)に形成される渦の非対称性に大きく依存する。もし歪みなし砂れんに対し、完全に歪みなしの波が作用し、底面付近の流速波形が正弦波形であるとすれば、何ら岸沖方向の正味の流れは生じない。有限振幅性による上下非対称に歪んだ流速波形が作用してはじめて一方向に流れが生じる。ここでもし流速波形は正弦波形で歪まず、砂れん形状が歪みを持ったとすれば、やはり一方向に流れが生じる。しかしこの場合、流速波形を適当に歪めることにより、再び正味の流れがゼロに近い状態にすることができるであろう。このように、表面波形あるい

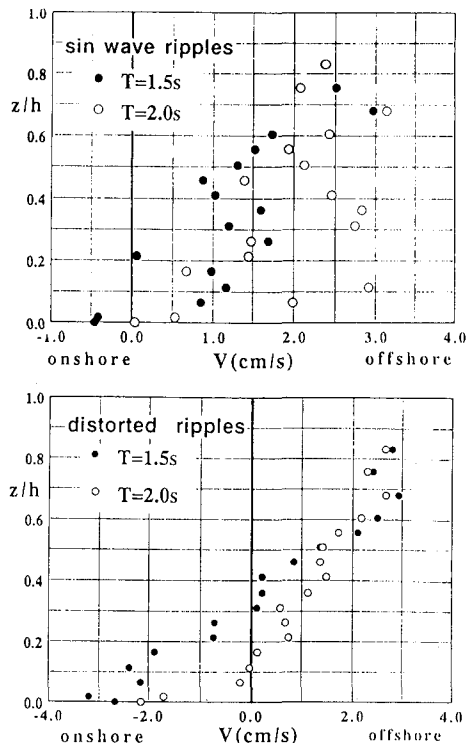


図-3 平均流の鉛直分布

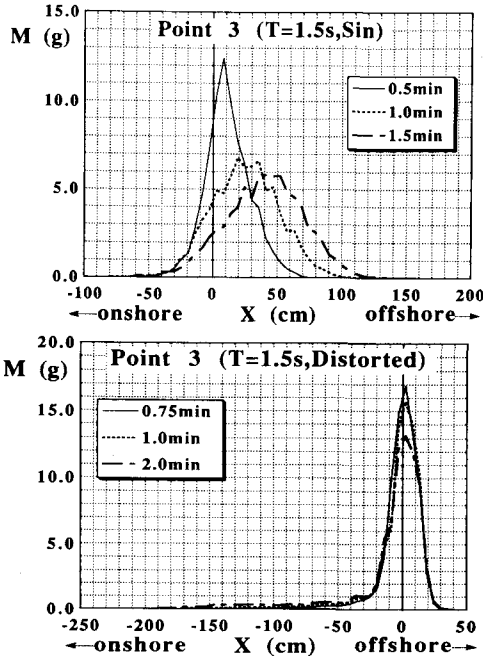


図-4 砂の岸沖方向の分散の時間変化

は流速波形の歪み度と砂れん形状の歪み度とは、正味の流れに対し線形的な結合で寄与すると考えることができる。また表面波形または流速波形の前傾度あるいは前後の非対称性もまた砂れん後流渦の非対称性に寄与する。そこで図-5に示すように、水面波形の上下の非対称による歪み率 $S_1 = (H_c - H_b)/H$ 、水面波形の前後の非対称による歪み率 $S_2 = (L_R - L_F)/L$ 、砂れん形状の歪み $S_3 = (\lambda_R - \lambda_F)/\lambda$ として、砂の分布の重心の移動速度が次式のように表せるものとする。

$$[V_g]^* = \sum a_i S_i \quad (i=1, 2, 3)$$

ただし、 $[V_g]^*$ は無次元数（沖向き正）で、

$$[V_g]^* = (V_g/U_m)(W/U_m)(h/\eta)$$

であり、 U_m 、 W 、 h 、 η は、それぞれ底面での水粒子軌動最大速度、砂の沈降速度、水深、砂れんの波高であり、 a_i は経験定数である。表-1に示した実験結果を上式に適用し最小二乗法で a_i を求めてみた。ただし水面波形の非対称歪み率は、今回の実験における測定値を用いた。その結果、 $a_1 = 0.044$ 、 $a_2 = -0.028$ 、 $a_3 = 0.033$ となり重回帰係数 $r = 0.91$ であった。図-6に $[V_g]^*$ に関する実験値と計算値の相関プロットを示すが、固定床砂れん上での岸沖漂砂の特性を比較的良く表しているようである。すなわち波の有限振幅性による上下の非対称歪みである第一項は沖向き、前傾度すなわち前後の非対称歪みの第二項は岸向き、歪み砂れんに関する項 S_3 は定義上負であるので岸向きの砂移動に貢献することになる。岸沖漂砂には当然のことながら海底勾配の影響もあるはず

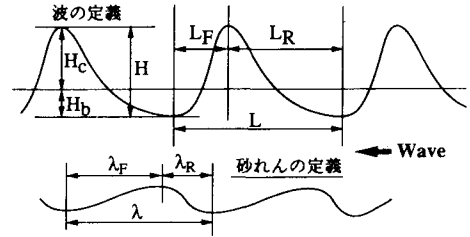


図-5 波と砂れんの定義

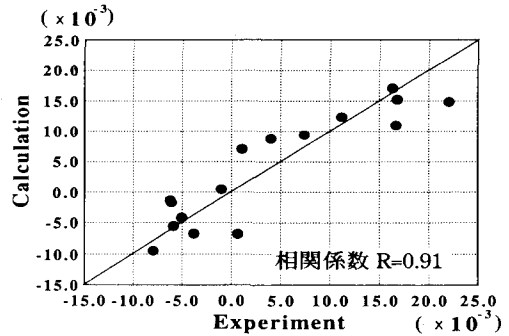


図-6 実験値と計算値の相関

である。そこで式に第四項として、 $a_4 \cdot \tan \beta$ (β は海底勾配) を追加した場合についても検討したが、その寄与は相対的に小さかった。これは、固定床砂れん上での砂移動機構のほとんどが浮遊機構によるためであろうと思われる。

(3) 歪み砂れんマットの適用条件

本研究は、歪み砂れんが岸向きに砂を移動させることを利用して人工海浜の沖向きの砂移動を制御し、海浜の安定を図ることを目的としている。そのためには、歪み砂れんが砂を岸向きに移動させる条件を知る必要がある。そこで今回得られた経験式を用い、モンテカルロ方式で調べてみた。波の上下の非対称歪み率 S_1 については、Goda (1964) による波の有限振幅波の実験値を定式化して与えた。波の前後の非対称歪み率 S_2 は、石田 (1983) による理論値に著者らの実験値を加味して定式化して与えた。石田の理論は、海底勾配が $1/10$ のものである。データに限りがあるので、勾配ゼロと $1/10$ の間は直線的に内挿した。また計算に当たっては、合田による碎波指標で碎波領域を除去した。図-7にその結果を示す。図中中間とは、重心移動速度が $-0.005 \leq [V_g]^* \leq 0$ の範囲に入るもので、実際には顕著な岸向きの砂移動が見られない領域と定義した。図から歪み砂れんは、相対波高 (H/h) が $0.4 \sim 0.5$ より小さい場合にのみ砂を岸向きに運ぶことが分かる。すなわち歪み砂れんによる岸沖漂砂の制御は、沖浜帯においてのみ有効と言える。この実験範囲において、海底勾配 $\tan \beta$ が大きいほど岸向き移動

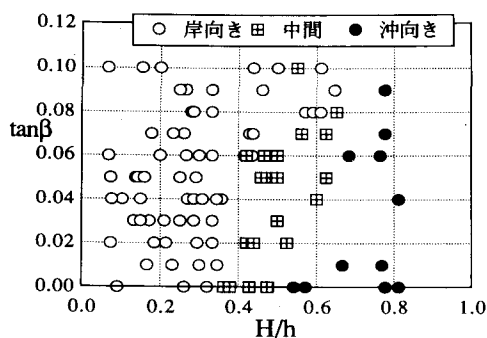


図-7 歪み砂れんマットの適用範囲

の傾向が大きくなっているのは、海底勾配が大きくなるにつれ波の前後の非対称度が大きくなるためと思われる。

3. 歪み砂れんマットの活用に関する実験

(1) 海底掘削法面の保持

上記と同じ実験水路の一端に、碎波帯を1/5、沖浜帯を1/20の初期勾配で中央粒径0.16mmの砂を敷いて海浜をつくり、これに入射波高8cm、周期1.6sの波を長時間作用させて、図-8-(上)に示すような平衡海浜をつかった。これに対し図のようにA、B、Cの3ヶ所で海底を掘削した場合について、波を作用させた後の掘削法面の崩壊が、歪み砂れんマットによりどの程度防止できるかを調べた。A以外は沖浜帯に位置する。これは、砂を盛土してつくった人工海浜の沖向きへの砂の流出防止機能を調べることにともなう。歪み砂れんマットはコンクリート製で、合成繊維製の帆布の上に瓦と同じ原理で積み合わせたものであり、地形の変化に追従でき、沈下も防止できるようにしてある。図中cutBの場合についての断面変化を沖側から土量累積し、掘削したままの場合および掘削法面に歪み砂れんマットを施した場合について示したのがそれぞれ図-8-(中)、図-8-(下)である。断面は水路の中央に沿って超音波式砂面計で測定し、いずれも平衡勾配になぞらえて手で均した初期断面の場合を縦軸の移動量ゼロ($\Sigma q = 0$)としている。波作用後0.5時間では、何れも土量変化が大きくでているが、この変化の中には波が作用したことによる水路の幅方向の地形不陸も含まれている。従って、これらの図は、0.5時間後を基準として見た方がより正しい評価ができるであろう。図から、法面に対策がない場合は、全域の砂が沖側へ流出しているが、歪み砂れんマットで法面を保護した場合には、変化がかなり小さくなっている。

(2) 土捨てによる養浜砂の沖側流出防止

図-9-(上)に示すように、前述の(1)の場合と同じ平衡断面の沖浜帯の一區間に歪み砂れんマットを設置し、

その岸側に約1(liter/hr.)の割合で15(liter)の砂を断続的に投入して人工海浜をつくる場合を想定した。同図に波作用後の断面変化を、図-9-(下)に沖側からの土量累積曲線の時間変化を示す。これらの図から、岸側での土捨てにもかかわらず土量の累積値が歪み砂れんの区間で負の値を示しており、歪み砂れんのすぐ沖側の砂が岸向きに運ばれていることが分かる。また歪み砂れんの岸側へ堆積していく砂の沖向きへの移動は歪み砂れんにより明らかに阻止されている。

同様な実験を、長さ4m、幅15cm、高さ20cmの二次元小型水槽で行った。使用した底質は、粒径0.08mmのガラスビーズで、砂れんの形状、砂の浮遊状況の通常スケールでの水槽内現象の再現性に留意しつつ試行錯誤の上、入射波高2cm、周期0.9sの波に対する平衡海浜を図-10の上段のように求めた。図のように沖浜帯に、図-1に示す歪み砂れんの1/3のスケールの歪み砂れんマ

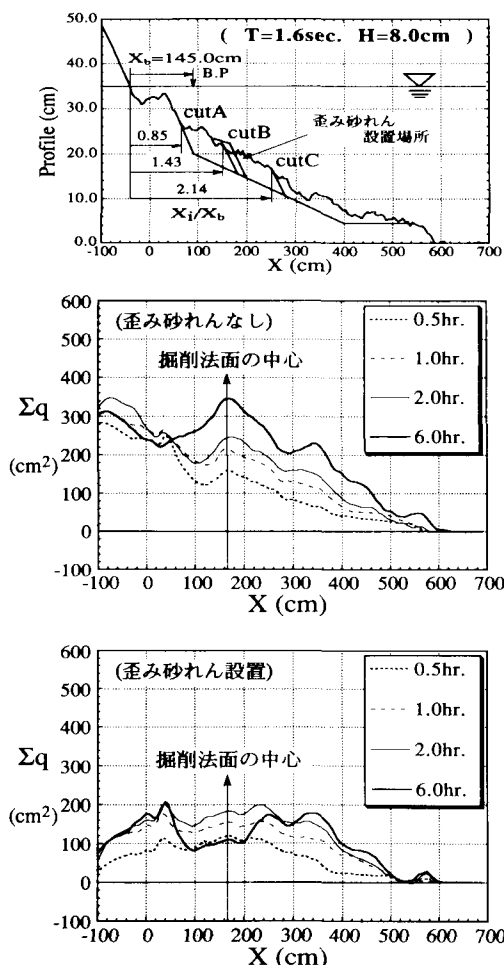


図-8 掘削位置(上)とcutBでの土量累積曲線の相違(中,下)

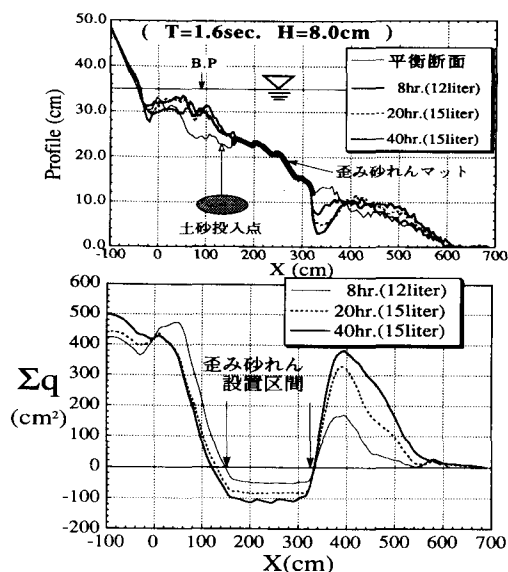


図-9 歪み砂れんマット施工時の断面形状変化(上)と土量累積曲線(下)

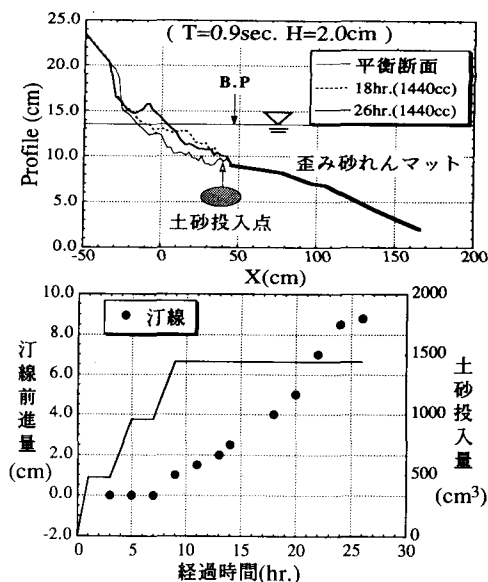


図-10 小型水理模型実験での実験結果

ットを敷き、その岸側に図-10下段に示す割合でガラス砂を投入し、波を作用させた。波作用18時間後の断面は中型土砂投入実験の図-9-(上)の断面とよく似ており、さらに波を作用することで、ついには前浜が大きく前進している。これは先の中型実験でも、もし土砂投入をさらに継続すれば起きえたことで、歪み砂れんマットによる人工海浜の保持の可能性を示唆するものである。

4. まとめ

固定床砂れん上の砂の移動特性を明らかにすると共に、人工海浜の沖浜帯に歪み砂れんマットを設置することにより、底質の沖向きの流出を防止できる可能性があることが分かった。

なお本研究は、小島治幸九州共立大学助教授のご支援、及び三原泰司 (JR 東日本勤務)、大沢文彦 (東亜建設工

業勤務)、中村聡(九州大学大学院工学研究科修士課程1年)の努力と協力により成しえたものである。また歪み砂れんマットの製作については、水工技研の嶋田長彦氏の協力を得た。ここに記して感謝する次第である。

参考文献

- 石田 啓・山口 登 (1983): 斜面上の碎波の一理論とその応用, 第30回海講論文集, pp. 34-38.
- 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, 海岸論文集, 第39巻, pp. 476-480.
- Inman, D. L. and E. B. Tunstall (1972): Phase dependent roughness control of sand movement, Proc. 13th ICCE, pp. 1155-1171.
- Goda, Y. (1964): Wave forces on a vertical circular cylinder, experiments and a proposed method of wave force computation, Rept. of Port and Harbour Res. Inst., No. 8, pp. 1-59.