

斜板消波潜堤 (SURF) のマウンド内の

浸透流場と洗掘特性について

上野成三*・小山文男**・石野和男*

宇多高明***・村井禎美****

1. はじめに

最近、沿岸域の静穏域確保を目的として、数々のタイプの海域制御構造物が提案されている。斜板消波潜堤 (SURF) はその一形式であり、傾斜した天端 (斜板) を特徴とする新型潜堤である (図-1)。

SURF の消波・波力特性、滑動安定性に関しては既に明らかにされており (小山ら, 1988), 消波・波力に関する設計法がほぼ確立されている。また、洗掘問題に関しては、堤体前面の開口部の位置が局所洗掘に与える影響や堤体沖側の地形変形特性などが明らかにされている (宇多ら, 1988)。しかし、堤体の安定上重要となる堤体近傍、特にマウンド下面の洗掘特性については十分に検討されていない。マウンド下面の洗掘に関してはマウンド内の浸透流が大きく関与すると考えられ、特に SURF のような潜堤タイプの場合、堤体上の碎波により堤体岸側に大きな wave step-up が生じるため、マウンド内に冲向きの浸透流が発生し、マウンド下面の底質が吸い出されるという可能性が考えられる。

そこで、本研究では、SURF のマウンド内の浸透流によるマウンド下面の底質の吸い出し現象に着目した。まず、固定床実験により、レーザ流速計を用いてマウンド内の捨石間隙内の真の浸透流場の特性を明らかにした。次に、移動床実験を実施し、SURF のマウンド内の底質移動と地形変化特性を明らかにし、固定床実験で得られ

たマウンド内の浸透流場と SURF 周辺の流速場の関連からマウンド内の洗掘特性について論じた。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は、二次元水槽 (147 m×B0.8 m×H1.6 m) の水路端に勾配1/10の一樣斜面と水平床からなる架台を設置し固定床としたものと、水平床部の沖側端部から長さ 6.0 m に渡って中央粒径 $D_{50}=0.073$ mm の砂を敷き詰めて移動床としたものの二種類を用いた (図-2)。通常の潜堤に関する二次元実験を行うと堤体岸側の wave set-up 量 $\bar{\eta}$ は沖波波高 H_0 の約20%に達し、極めて非現実的な値となる。そこで、本実験では、水路中央に仕切り板を設けて還流水路を作り、堤体岸側の水を沖側に自然流下させて、堤体岸側の $\bar{\eta}$ を調節した。ここでは、一樣勾配斜面上の二次元実験における $\bar{\eta}$ を参考に、 $\bar{\eta}$ を換算沖波波高 H'_0 の約10%とした (図-3)。

SURF の堤体およびマウンドの模型の諸元を表-1 に示す。縮尺1/25とし、マウンドの捨石は中央粒径 $D_{50}=20$ mm の碎石を用いた。

実験条件を表-2 に示す。固定床実験では、構造モデルとして SURF のマウンド厚 δ を 4, 8, 12 cm の三種類に変化させた実験と、比較のため、構造モデルを直立混成堤とした実験を行った。波浪条件は周期 $T=2$ s、波高 $H=12\sim36$ cm の規則波とした。ここで、波高 H は堤体を設置しない状態での堤体設置予定位置での波高である。移動床実験では、構造モデルをマウンド厚 $\delta=$

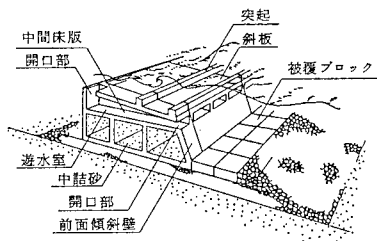


図-1 斜板消波潜堤 (SURF) の概念図

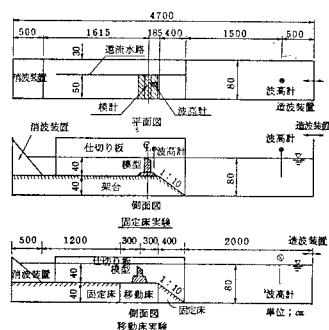


図-2 実験装置

* 正会員 工修 大成建設(株) 技術研究所

** 正会員 工修 大成建設(株) 土木設計部

*** 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室室長

**** 正会員 工修 建設省河川局海岸課

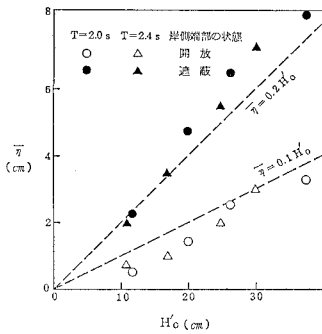

 図-3 wave set-up 量 $\bar{\eta}$ と換算沖波波高 H'_0 の関係

表-1 構造諸元

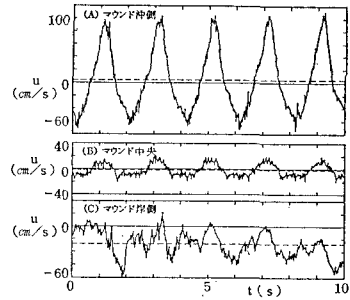
諸元	実験	諸元	実験
斜板幅 B	80 cm	堤体前面マウンド長 l_1	10.35, 52 cm
高さ S_1	4.5 cm	堤体後面マウンド長 l_2	25 cm
突起幅 S_2	4.5 cm	マウンド厚さ δ	4.8, 12 cm
斜板勾配 $1:s$	1/10	マウンド配	前面 1/8 後面 1/2
前壁開口率 e_1	10%	捨石重量 W_{s1}	5~12 gf/個
斜板開口率 e_2	10%	被覆石重量 W_{s2}	128 gf/個
水深 H	40 cm	根固めブロック W_8	1.6 kgf/個
没水深 R	4 cm		

表-2 実験条件

底面	構造モデル		波浪条件		
	構造形成	マウンド厚 δ (cm)	マウンド長 l_1 (cm)	波高 H (cm)	周期 T (s)
固定床	SURF	4.0	35.0	12.0~36.0	2.0
		8.0	35.0	12.0~36.0	2.0
		12.0	35.0	12.0~36.0	2.0
移動床	SURF	8.0	10.0	28.0	2.0
		35.0	12.0, 20.0, 28.0	2.0	369
		52.0	28.0	2.0	369

8 cm とし、堤体沖側マウンド長 $l_1=10, 35, 52$ cm に変化した実験を行った。波浪条件は周期 $T=2$ s、波高 $H=12\sim 28$ cm の規則波とした。

マウンド内の浸透流速測定は、後方散乱形式の光ファイバー型レーザー流速計を用いて行った。水路ガラス面外側からレーザービームを発射し、捨石間隙内にビームの焦点を合わせることで、間隙内の流速を測定した。また、マウンド内の平均流速は、染料の拡散をビデオにより記録しその軌跡を読みとることにより求めた。SURF 周辺の流速測定には、電磁流速計、プロベラ流速計を、波高測定は容量式波高計を用いた。


 図-4 SURF 周辺の水平流速 u の時間波形

3. 固定床実験によるマウンド内浸透流場の特性の解明

(1) SURF 周辺の流速場の特徴

まず、SURF 周辺の流速の時間波形の特徴を調べた。波浪条件 $H=28$ cm、 $T=2$ s のもとでの、底面上約 1.0 cm の位置におけるマウンド沖側部 (A)、マウンド中央部 (B)、マウンド岸側部 (C) の水平流速 u の時間波形を図-4 に示す。(A) では、軌道流速 $\bar{u}$ に流速のピークの位相時で顕著となる乱れ u' を伴う通常の波動場の底面近傍の流速波形となった。これに対して、(B) では、軌道流速 $\bar{u}$ が、(A) に比べてかなり減衰するが、波の周期成分をはっきりとした形で維持しており、さらに、捨石から発生すると考えられるかなり大きさの乱れ u' が全位相にわたって発生した。そのため、マウンド下面の底質移動を考えた場合、 $\bar{u}$ 、 u' により、マウンド下面の底質が巻き上げられ、掃流・浮遊状態になることが予想される。また、(C) では、堤体上で碎波した水塊が堤体岸側に落ち込むことによって生じる突っ込み流れが発生し、乱れ u' を伴った極めて不規則な流速波形となる。そのため、堤体岸側では、突っ込み流れにより底質が大きく巻き上げられるものと考えられる。

次に、SURF 周辺の平均流の構造を調べた。波浪条件 $H=28$ cm、 $T=2$ s のもとでの、堤体の沖側 ($x=-150$ cm)、岸側 ($x=100$ cm) の水平流速 u の時間平均値 $\bar{u}$ の鉛直分布と、マウンド内の水平流速 u の時間平均値 $\bar{u}$ を図-5 に示す。ここで、 x は堤体中心からの距離で、岸側を正とする。堤体沖側の流速分布は、波の trough レベル以上で岸向き流れが集中した。これは、波動場の Euler 平均流速の分布である。これに対し、堤体岸側の流速分布は、trough レベル以下で岸向き流れを示した。これは、堤体上の碎波によって岸向きの質量輸送が生じていることを示すものである。そのため、SURF 周辺で生じる岸向き流れにより堤体沖側の浮遊砂を堤体岸側に運ぶ形で、SURF が堤体沖側の底質を堤体岸側にトラップすることが予想される。マウンド中央部では、

堤体沖側で生じる wave set-up により、流速約 2cm/s の冲向き流れが生じた。そのため、マウンド内の底質が冲向きに移動することが予想される。

(2) マウンド内浸透流の平均流速 $\bar{u}$ と波高 H の関係

上述のマウンド内浸透流の平均流速は、レーザー流速計による測定値にばらつきがみられたので、移流拡散する染料の重心を軌跡を読み取って求めたものである。そのため、流速の読み取り精度の問題から、波浪条件と浸透流速の関係までは求められなかった。そこで、ここでは、富永ら(1969)の定常流速実験による実験式によりマウンド内の平均浸透流速を見積り、波高とマウンド内の浸透流速の関係を調べた。富永らは、捨石層の摩擦損失係数 f を式 (1) のように定義し、 f の実験式として式 (2) を提案している。

$$I = f \frac{\bar{u}^2}{4R2g} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$f = \frac{60}{Re} + \frac{3.6}{\sqrt{Re}} + 1.05 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで用いられるレイノルズ数 Re 、径深 R はそれぞれ式 (3)、式 (4) で定義される。

$$Re = 4.9 \frac{\bar{u}D}{(1-p)\nu} \quad \dots\dots\dots (3)$$

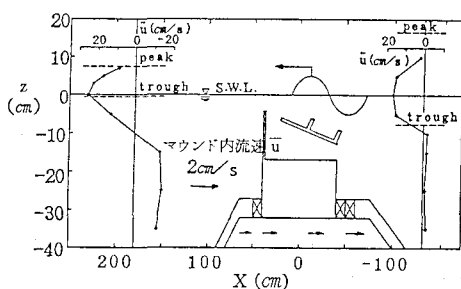
$$R = \frac{mp^3D}{4.9(1-p)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 I : 動水勾配、 $\bar{u}$: 捨石層の断面平均流速、 g : 重力加速度、 D : 粒径、 p : 間隙率、 ν : 動粘性係数、 m : 石の形状を表わす係数(砕石の場合 $m=0.3$)
本実験では、堤内外の水位差 $\Delta h \approx \bar{\eta} \approx 0.1H'$ であり、マウンドの透水体としての代表長さとして堤体幅 B をとると、動水勾配 I は式 (5) で表わされる。

$$I \approx \frac{\Delta h}{B} \approx \frac{\bar{\eta}}{B} \approx \frac{0.1H'}{B} \approx \frac{0.1H}{B} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式 (2)、式 (5) より、 $\bar{u}$ と H の関係が式 (6) として示される。

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{0.8Rg}{Bf}} H \quad \dots\dots\dots (6)$$



図—5 SURF 周辺の平均流速 u

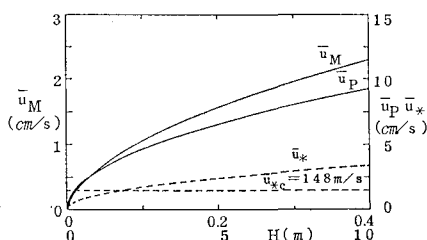
また、富永らは捨石層内の間隙に働く摩擦応力 τ 、摩擦速度 u_* を式 (7) で定義するとほぼ底質移動限界が推定できるとしている。

$$\tau = \rho g R I = \rho u_*^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

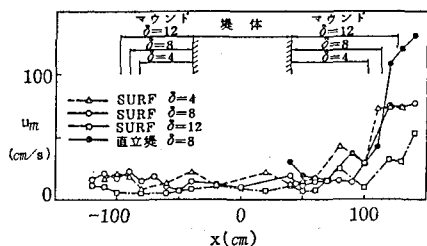
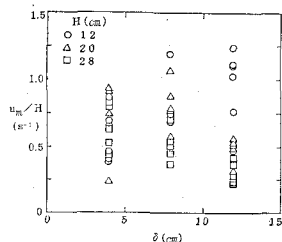
式 (6) より算定し本実験条件 ($B=80$ cm, $D=2$ cm) での平均浸透流速 u_M および現地スケール ($B=20$ m, $D=50$ cm) での平均浸透流速 u_P と H の関係を図—6 に示す。同図には、現地スケールでの摩擦速度 u_* と岩垣公式による $D_{50}=0.2$ mm の底質に対する移動限界摩擦速度 u_{*c} も併せて示している。現地スケールの u_M は、スケール効果による f の違いを考慮するため、式 (2) により算出した現地スケールでの f を用いて計算した。また、本計算では、動水勾配 I がマウンドの鉛直方向に一樣に作用するものとしているため、浸透流速はマウンド厚には依存しない結果となる。式 (3) 中の m について、富永らは砕石の値と $m=0.3$ を提案しているが、実験で用いた捨石については透水試験を行ったところ、 $m=0.6$ となった。この原因の一つとして、実験で用いた捨石は染料を見やすくするためにペイントを施したため、普通の砕石よりやや丸みを帯びたことが考えられる。そこで、実験室スケールの計算には $m=0.6$ を、現地スケールの計算には $m=0.3$ を用いた。実験室スケールでは、 $H=28$ cm で $u_M=2$ cm/s となりほぼ実験値と等しい。現地スケールでは、波高が約 2m 以上でマウンド下面の底質移動が生じる規模の平均浸透流速が生じることになる。しかし、 $H=10$ m での u_* はたかだか u_{*c} の 2 倍程度であり、マウンド内の捨石粒径の調整等により u_* を u_{*c} 以下にすることは十分可能である。これらの結果から、平均流のみによる底質移動は小さいと考えられる。

(3) マウンド内浸透流の軌道流速 $\bar{u}$ の空間分布特性

マウンド内の浸透流の流速波形は、図—4 に示したように、平均流速 $\bar{u}$ より軌道流速 $\bar{u}$ が卓越しており、底質移動を考える上で浸透流を平均流速として評価しただけでは不十分である。そこで、浸透流速の軌道流速 $\bar{u}$ を詳しく調べてみるために、波浪条件 $H=28$ cm, $T=2$ s のも



図—6 平均浸透流速 u_M , u_P 、摩擦速度 u_* と波高 H の関係

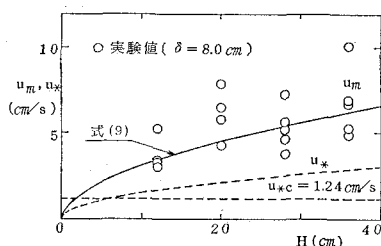

 図-7 軌道流速振幅 u_m の岸沖分布

 図-8 u_m/H とマウンド厚 δ の関係

とでの、マウンド厚 $\delta=4, 8, 12$ cm の場合のマウンド内の底面上約 1 cm の軌道流速振幅 u_m の岸沖分布を図-7 に示す。同図には、比較のため、構造モデルを直立混成堤 ($\delta=8$ cm) とした場合の u_m の岸沖分布も併せて示している。 u_m はマウンド沖側法面部で急激に減少し、マウンド中央部ではほぼ一定値に漸近する様子が分かる。マウンド中央部の u_m は 10 cm/s に達し、マウンド内全体にわたって底質移動が生じるものと考えられる。この u_m について混成堤と SURF を比較した場合、SURF の反射率が小さいため、 u_m は混成堤より SURF の方が小さくなった。そのため、SURF のマウンド沖側の洗掘規模は、混成堤に比べて小さくなるものと考えられる。

マウンド中央部 ($-100 \text{ cm} < x < 100 \text{ cm}$) における u_m とマウンド厚 δ の関係を図-8 に示す。 u_m は δ の増加に対して若干減少する形となるが、明確な関係にはない。これは、マウンド内の浸透流が、管路の浸透現象と同ぐく、水位差と透水性により決定されるため、マウンド厚、すなわち透水体の断面積には大きく関係しないものと考えられる。そのため、浸透流速の低減にはマウンド厚よりマウンド材の透水性を変化させる必要があることが明らかになった。

(4) マウンド内浸透流の軌道流速振幅 u_m と波高 H の関係

マウンド厚 $\delta=8$ cm の場合のマウンド中央部 ($-100 \text{ cm} < x < 100 \text{ cm}$) における u_m と H の関係を図-9 に示す。 u_m は H の増加に従って増大した。この u_m と H の関係を式 (1) に基づいて求めてみた。ここで、堤内外


 図-9 軌道流速振幅 u_m 、摩擦速度 u_* と波高 H の関係

の水位差 Δh は、堤体岸側で流速変動に波動性が失われていることから、堤体沖側の水位変動に規定されているものとして、 Δh が $H/2$ に一致するとした。動水勾配 I は式 (8) となる。

$$I \approx \frac{\Delta h}{B} \approx \frac{H}{2B} \quad \text{..... (8)}$$

式 (8) より、 u_m と H の関係は式 (9) となる。

$$u_m = \sqrt{\frac{4Rg}{Bf}} H \quad \text{..... (9)}$$

式 (9) により計算した u_m と H の関係を図-9 に併せて示す。定常流実験に基づいた実験式による計算値でありながら、波動場である実験値との一致は良く、式 (9) によってマウンド内の浸透流速振幅 u_m をほぼ評価できることが示された。また、同図には式 (7) により算出した摩擦速度 u_* と後述する移動床実験に用いた粒径 $D_{50}=0.073 \text{ mm}$ の底質の移動限界摩擦速度 u_{*c} を参考のため併せて示した。また、式 (9) により現地スケールでの u_m を計算すると、 $H > 0.5 \text{ m}$ で u_m は移動限界流速を越え、常時波浪によっても、かなりの量の底質移動が生じることが明らかになった。

これらの結果から、マウンド内の底質移動を考えた場合、マウンド内浸透流の軌道流速 $\bar{u}$ および乱れ u' によりマウンド下面の底質には容易に掃流・浮遊状態になり、さらに、冲向きの平均流速 $\bar{u}$ によって Net の底質移動は冲向きとなるため、マウンド下面の砂床の洗掘が予想される。しかしながら、最終的なマウンド内の地形変形には、マウンド内外の漂砂フラックスのバランスで決定されるため、固定床実験では検討していないマウンド外からマウンド内への漂砂フラックスを検討する必要がある。

4. 移動床実験によるマウンド内外の洗掘特性の解明

(1) SURF 周辺の地形変化の特徴

堤体前後の 6 m の範囲に細砂 ($D_{50}=0.073 \text{ mm}$) を敷き詰めて底面を移動床とし、実際の SURF 周辺の地形変化を調べた。 $H=28 \text{ cm}$, $T=2 \text{ s}$ の規則波を 3 時間作用

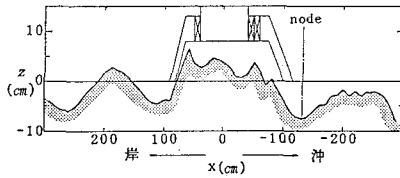


図-10 SURF 周辺の地形変化

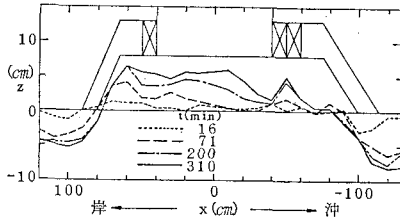
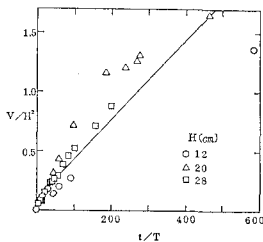


図-11 マウンド内の堆積地形の時間変化

図-12 マウンド内の堆積量 V の時間変化

させた場合の SURF 周辺の地形変化を図-10 に示す。本実験条件では、図-9 に示したように、 $H > 10$ cm でマウンド内の底質は移動状態にある。マウンド内は、固定床実験からの予想に反して堆積した。マウンド内の底質移動状況を詳しく観察してみると、マウンド下面の底質は岸沖方向に前後運動をしており、固定床実験からの予想通りに、浸透流の軌道流速が底質移動に大きく影響することが確認された。しかし、マウンド内の沖向き平均流により、堤体岸側から高濃度の浮遊砂がマウンド内に進入し沈降していることも同時に確かめられた。マウンド沖側部では、入江ら(1984)の示した通常の防波堤前面で見られる L -type の洗掘形態となった。また、マウンド沖側は全体的に侵食された。ここでは示していないが、堤体沖側の洗掘量の多くが岸側部の固定床上に堆積した。マウンド岸側の移動床部では、碎波の突っ込み流れによる底質の巻き上げと、堤体との汀線の間で形成される重複波による洗掘・堆積により、 L -type の洗掘形態となった。

(2) マウンド内の堆積状況の特徴

マウンド内での底質の堆積状況を詳しく調べてみるために、波の作用時間毎のマウンド内の地形変化を図-11 に示す。マウンド内の堆積はマウンド岸側から沖側に向かって徐々に進んだ。これは、マウンド内を浮遊砂が沖側に進行する際の沈降過程を反映していると考えられる。このことから、マウンド内の浸透流による洗掘量より、堤体岸側の浮遊砂が沖向き流れによりマウンド内に移流し沈降する量が卓越したため、結果としてマウンド内は堆積したものと考えられる。

マウンド内の底質の堆積量 V の時間変化を図-12 に示す。ここで、 V は水路の断面方向の単位当たりのマウンド内の堆積量である。 V はほぼ時間に比例する形で増加する。これは、沖向き流れによりマウンド内に流入する浮遊砂量とマウンド外へ流出する漂砂量との差が一定であることを示すものである。

5. 結 論

レーザ流速計を用いて SURF のマウンド内の浸透流場の特性を明らかにし、マウンド内の底質の吸い出し現象を中心に SURF の洗掘特性を論じた。固定床実験によると、マウンド内の wave step-up による沖向き定常流速 $\bar{u}$ は最大 2 cm/s に達し、軌道流速 $\bar{u}$ や乱れ u' による底質の巻き上げと相まって沖向きの Net の底質移動が生じる。その結果、マウンド内の砂床の洗掘が予想された。移動床実験によると、このマウンド内の沖向きの底質移動が確認されたが、SURF の場合、堤体岸側の高濃度の浮遊砂がマウンド内に流入するため、結果としてマウンド内は堆積した。これにより、マウンド内の洗掘を考える場合、マウンド内の流速場による底質移動だけでなく、堤体周辺の底質移動状況を考慮することが重要であることが認識された。

なお、本研究は、東急建設(株)、(株)間組との共同研究により実施されたものであり、藤川富夫氏、渡会英明氏、加藤雅也氏、湊隆次郎氏、本田陽一氏の御協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 入江 功・近藤隆道・赤石正弘・寺崎賢次 (1984): 重複波による防波堤前面での海底洗掘—底質の移動機構に着目した研究—, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 350~354.
- 宇多高明・村井禎美・館 亨彦 (1988): 斜板消波潜堤の洗掘に関する実験的検討, 第 43 回年次講演会, pp. 764~765.
- 小山文男・清水正巳・中塚健司・宇多高明・村井禎美 (1988): 斜板を有する新型潜堤 (SURF) の開発, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 512~516.
- 富永正照・坂本忠彦 (1969): 海岸堤防の根固め工について, 第 16 回海岸工学講演会論文集, pp. 269~275.