

透水性一様斜面上に設置した袋型被覆材に 作用する波力と耐波安定性に関する研究

STUDY ON A WAVE FORCE ACTING ON A FILTER UNIT ON SLOPING BREAKWATER AND ITS STABILITY

島袋洋行¹・水谷法美²・小山裕文³

Hiroyuki SHIMABUKURO, Norimi MIZUTANI and Hirofumi KOYAMA

¹正会員 修(工) 沖縄県企画部八重山支庁新石垣空港建設課(〒907-0002 石垣市字真栄里438-1)

²正会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 工修 株式会社テトラ 環境事業本部事業推進グループ(〒108-0073 東京都港区三田3-11-34)

Stability of an Filter Unit (FU) on sloping breakwater has been investigated in relation with wave forces acting on it. Laboratory experiments have been conducted to measure the stability and pore pressures. Numerical simulation also computes the pore pressure of sloping breakwater. It is found that the uplift force due to difference of pore pressures on upper and lower surfaces of an FU acts on the FU installed near the shoreline and it affects stability significantly. Numerical analysis is confirmed to reproduce well the features of pore pressure in the FU layer as well as velocity field above the sloping breakwater. It is also revealed that the Hudson coefficient of FU is larger than that of armor rubble, which indicates that an FU is suitable in practical use as far as stability is concerned.

Key Words : Filter Unit, Stability, Sloping Breakwater, Hudson formula

1. はじめに

袋型被覆材(フィルターユニット, 以下FUと略す)は網状の袋に砕石や玉石等を詰めた水工資材のことで, 主に洗掘防止用の被覆材として使用されている。これまでは主に河川等において, 河川堤防の侵食防止や河床洗掘防止などの目的で使用されてきている。近年, 海域での利用も拡大しており, 使用例としては橋脚基礎工事の被覆工が施工されるまでの洗掘防止対策など, 従来は仮設構造物としての用途が多かったが, 最近では本設として, 防波堤の被覆材としての用途も求められている¹⁾。FUには, 設置に特殊な装置を必要としない, 施工が早い, 消波ブロック等に比べて安価である, 材料の石材が入手しやすい, などの利点があり, その利用は資材の入手が困難な島国や発展途上国においても有用であると考えられ, 防波堤の被覆材としてのFUの技術の確立が望まれ, 耐波特性などが検討されてきている²⁾。

久保田ら^{3), 4)}はFUを混成堤マウンド被覆材として用いた場合の設計手法の確立を目的として水理模型実験により, 混成堤上におけるFUの耐波安定性に関する検討を

行い, その場合のFUの安定数を明らかにしている。しかし, 世界的には混成堤以外に傾斜堤の建設も多く, また日本においても中小港湾や漁港では傾斜堤の設置も少なくない。したがって, FUを防波堤の被覆材として使用するにあたっては, 混成堤だけではなく傾斜堤をも対象とした検討が必要不可欠である。

本研究では, 水理模型実験により透水性一様斜面上に, 中詰め拘束を特徴とするフィルターユニットS型(以下FU-Sと略す)を設置し, その耐波安定性を検討する。また, 斜面上の流速場, FU-Sに作用する圧力と波力を計測するとともに, 数値計算も行っており, FU-Sおよび透水性一様斜面における流速場・圧力場特性を検討した。そして両者の結果にもとづいてFU-Sの移動機構・耐波安定性を流体力と関連づけて考究する。

2. 実験方法

水理模型実験を, 図-1に示す名古屋大学工学研究科の

2次元造波水槽（長さ30m、幅70cm、高さ90cm）で実施した。8tのFU-Sを対象にその1/34スケールの模型を採用した（写真-1参照）。したがって、FU-S模型は、質量200g、直径9cm、高さ3cmである。なお、FU-Sとは、FUの天端面と底面の中心をひもで繋ぎ、FUに張力を与えることで中に詰めた石材の移動を拘束したものである。

実験では、斜面前面水域での水深 h を45cmと一定にした。実験水槽の岸側端には、中央粒径 $d_{50}=20\text{mm}$ の礫により一様勾配捨石斜面を形成した。なお、斜面勾配を1:2と1:1.5の2種類変化させた。この捨石斜面の表層に、図-2(a)に示すように隣接のFU-Sが重なり合わないようFU-Sを千鳥状に配列した（単被覆）。ただし、勾配1:1.5においては、図-2(b)のようにFU-Sの大きさの半分程度ずつ重ねた重被覆の配列でも実験を行った。FU-Sは汀線から鉛直高さ20cmの範囲まで設置したが、側面にはFU-Sを設置できない部分が生じるため、側壁とFU-Sの隙間に石材を詰めて、そこからの被害が進行しないようにした。

一様斜面上に設置したFU-Sの耐波安定性を把握するため表-1に示す条件で規則波を作用させた。周期 T を1.0s、1.4s、1.8s、2.0sの4種類変化させ、それぞれの周期の波に対して、入射波高 H を、FU-Sが移動しないレベルから0.5~1.0cmずつ増加させながら、移動限界を調べた。この際、同一波高での作用波の数を100波とし、FU-Sに被害が生じ始めるレベルの波高まで作用させた。ただし、FU-Sの大きさの半分以上移動したもの、あるいは転落したものを移動と定義し、それを被害FU-Sとして計上した。

また、実験では、図-3に示すように、常に水中下にあるA地点において波高、斜面上の流速、間隙水圧を計測した。また、FU-Sの被害が発生し始めるのが汀線付近であることから、汀線近傍においても斜面上の流速、間隙水圧を計測した。間隙水圧に関してはFU-Sの上面と下面の間隙水圧差を求めるため、FU-Sの上部および底部に間隙水圧計（共和電業製BPR-A-50KPS）を設置して計測した。また、A地点での流速を電磁流速計（ALEC電子製ACM-200P）で計測を行い、汀線近傍の流速に関してはキャンティレバー型流速計⁵⁾を製作し、計測を行った。また、汀線近傍のFU-Sに作用する流体力の特性を求めるため、別途FU-Sに作用する波力の計測も行った。波力の計測は、単被覆の場合を対象に、三分力計に鋼製枠を介して固定したFU-Sを汀線近傍に設置して行った。ただし、波力計測にあたっては、計

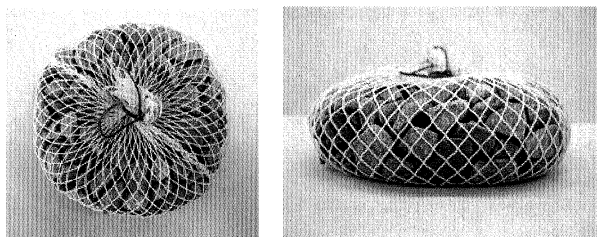


写真-1 FU-S模型

測用のFU-Sが周囲のFU-S、および底面（捨石斜面）に接触しないように、隙間を設けて設置している。また、波力とともに、キャンティレバー型流速計によるFU-S上の流速の計測も同時に行った。

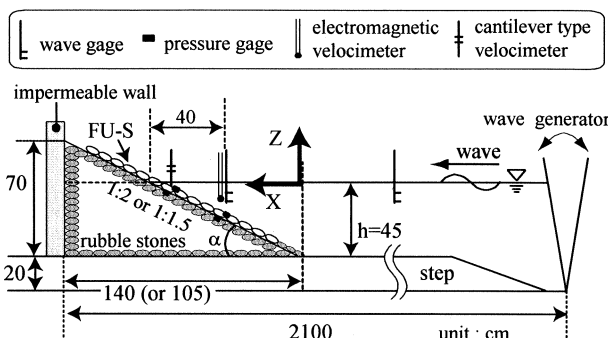


図-1 実験概略図

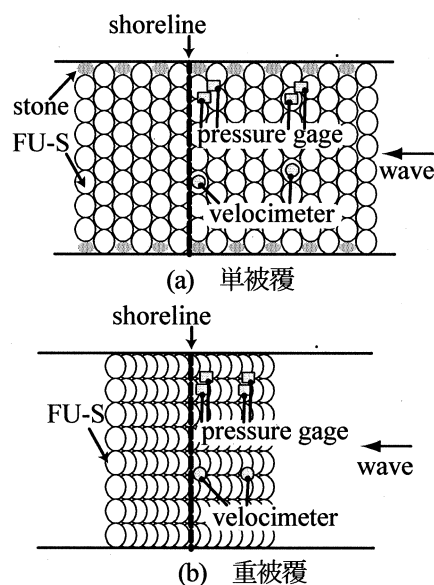


図-2 FUの被覆状況

表-1 実験条件

斜面前面水域 h	45cm
斜面傾斜角度 $\cot\alpha$	2.0, 1.5
FUの被覆条件	単被覆、重被覆（ $\cot\alpha=1.5$ の場合のみ）
入射周期 T	1.0s, 1.4s, 1.8s, 2.0s
入射波高 H	適宜決定

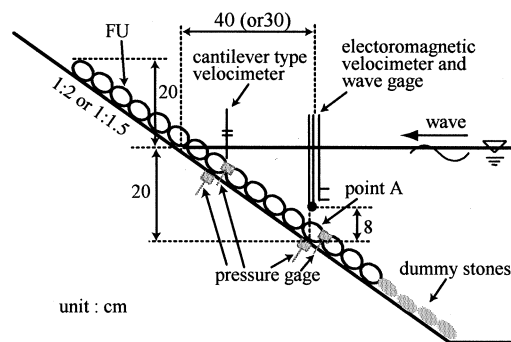


図-3 間隙水圧計・流速計の設置場所

3. 数値計算手法

FU-S層および透水性捨石斜面における圧力場特性を詳細に検討するため、本研究で用いた実験装置をモデル化して二次元波浪場の数値計算を行った。数値計算はVOF法にPorous Body Modelを組み合わせた解析手法を用いた。透水性捨石斜面を空隙率0.40の透水性セルでモデル化し、FU-S層を空隙率0.48の透水性セルでモデル化した。基礎式は以下の通りである^{6),7)}。

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} = q^* \quad (1)$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \gamma_z w \frac{\partial u}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - R_x + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zx}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial w}{\partial x} + \gamma_z w \frac{\partial w}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \gamma_v g - M_z - R_z + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \gamma_x \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z \tau_{zz}}{\partial z} \right) - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - \beta w \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\gamma_v F)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x F u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z F w)}{\partial z} = F q^* \quad (4)$$

ここで u と w はそれぞれ x , z 方向の流速成分, $q(x, z)$ は造波位置 $x = x_s$ でのわき出し強さ, Δx_s は $x = x_s$ での x 方向のメッシュ長, t は時間, g は重力加速度, ρ は流体の密度, F はVOF関数, β は付加減衰領域でのみ正の値を持つ減衰係数, γ_v は体積空隙率, γ_x と γ_z はそれぞれ x , z 方向の面積空隙率, τ はせん断応力, ν は動粘性係数, R_x と R_z は抗力項である。

4. FU-Sの移動機構に関する考察

(1) 流速と圧力

図-4のように、FU-Sの底部で計測した間隙水圧を p_1 , 上面で計測した間隙水圧を p_2 とし、式(5)のようにその差を dp と定義した。したがって、この dp が正であれば斜面法線方向上向きに間隙水圧による力、すなわち揚圧力がFU-Sに作用することになる。

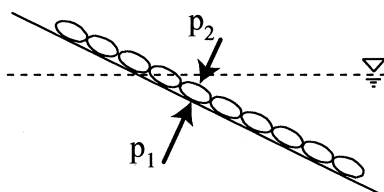
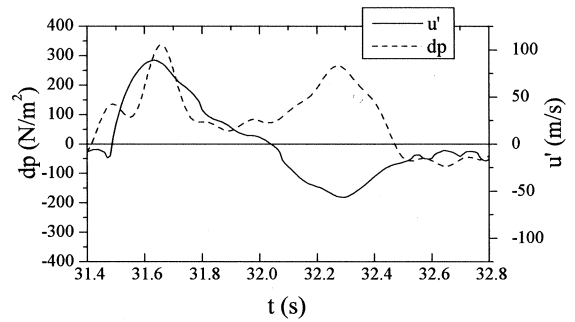


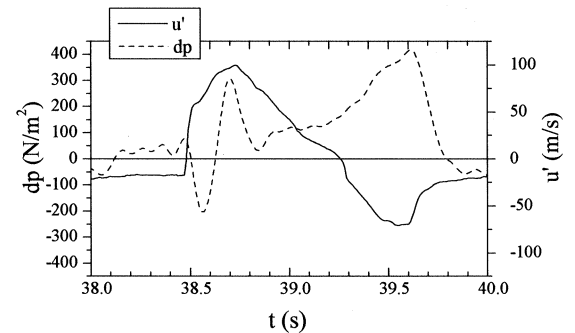
図-4 間隙水圧差の定義

$$dp = p_1 - p_2 \quad (5)$$

図-5は単被覆の条件での汀線近傍における斜面方向流速 (u') とFU-Sが受ける間隙水圧差 (dp) の時間波形を示したものである。ただし、斜面方向流速は岸向きを正としている。斜面方向流速が正のピークと負のピーク時に、FU-Sが受ける間隙水圧差が大きくなっている。すなわち、押し波、引き波の両段階において、斜面方向流速が正のピーク・負のピークとなる時にFU-Sが受ける揚圧力が大きくなる。一周内に二度の揚圧力のピークを示すことで、この両段階でFU-Sが不安定な状態となることが指摘できる。



(a) $\cot \alpha = 2.0$, $T = 1.4s$, $H = 13.4cm$



(b) $\cot \alpha = 2.0$, $T = 2.0s$, $H = 14.1cm$

図-5 斜面方向流速と間隙水圧差の時間波形

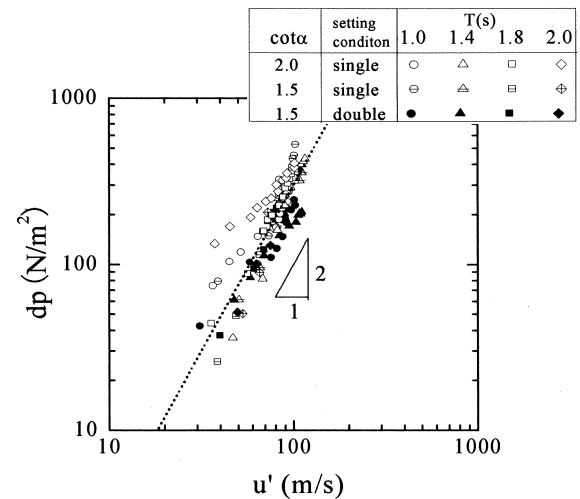


図-6 斜面方向流速と間隙水圧差の関係

図-6は斜面方向流速の最大値と間隙水圧差によりFU-Sが受ける揚圧力の最大値の関係を示したものである。これより、FU-Sに作用する揚圧力が斜面方向流速の2乗に比例していることがわかる。すなわちFU-Sには押し

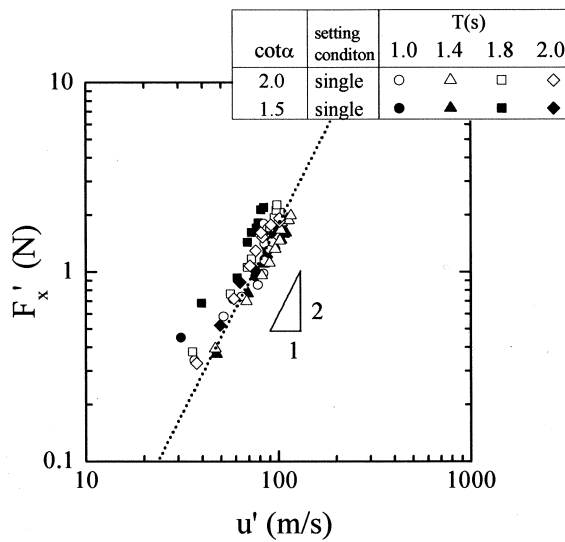


図-7 斜面方向流速と斜面方向波力の関係

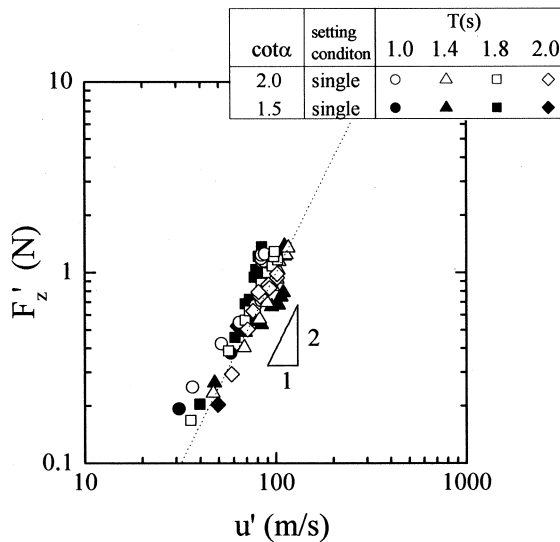


図-8 斜面方向流速と斜面法線方向波力の関係

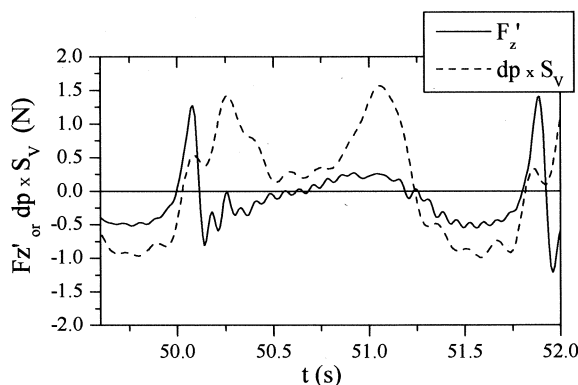


図-9 FU-Sに作用する斜面接線方向波力とFU-Sに作用する間隙水圧差の時間波形 (cotα=2.0, T=1.8s, H=15.5cm)

波、引き波時に斜面法線方向上向きに斜面方向流速の2乗に比例する揚圧力が作用するといえる。

(2) 流速と波力

FU-Sの被覆が単被覆の場合の汀線近傍で計測したFU-Sに作用する斜面方向および斜面法線方向波力を以下に示す。ただし斜面方向の波力を F'_x 、斜面法線方向の波力を F'_z とし、それぞれ岸向き、上向きを正としている。

図-7および図-8は汀線近傍におけるFU-Sに作用する斜面方向最大流速とFU-Sに作用する岸向き斜面方向最大波力、あるいは上向き斜面法線方向最大波力の関係を示したものである。図-7には傾きが2の線を示したが、 F'_x の流速にともなう変化の割合は直線とほぼ一致しており、FU-Sには斜面方向流速の2乗に比例した斜面方向の波力が作用していることが明らかとなった。同様に図-8に示すように、FU-Sには斜面方向流速の2乗に比例した波力が斜面法線方向にも作用していることが確認できる。また、斜面方向の最大波力は揚圧力が大きい位相に作用することが確認されており、FU-Sは揚圧力により不安定となった状態に岸向きの大きな波力の作用により移動を開始することが推察される。

図-9はFU-Sに作用する斜面法線方向波力と、FU-Sの底部と上部に作用する間隙水圧差に斜面法線方向のFU-Sの投影面積 (S'_v) を乗じたものの時間波形を示したものである。これより、押し波による間隙水圧差の一つ目のピークの前の間隙水圧差の極大値が、斜面法線方向上向きの波力の最大値に寄与していることが確認できる。また、斜面方向の岸向波力の最大値は間隙水圧差の一つ目のピークと同位相であることから、前述したようにFU-Sは揚圧力により不安定となった状態に岸向きの大きな波力が作用し、移動を開始することがここからも推察される。なお、 F'_z には明瞭な二つ目のピークが認められないが、これは波力計測時に設けた隙間などの影響によるものと思われる。

図-10は汀線近傍のFU-Sに作用する波力のリサーチ図を例示したものである。ただし、図中の斜線は斜面方

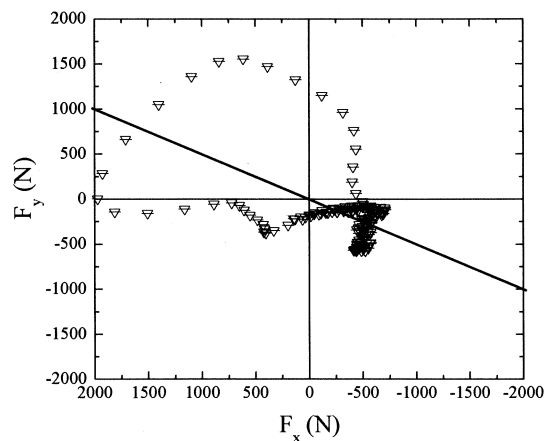


図-10 汀線近傍のFU-Sに作用する波力のリサーチ図の例 (H=15.9cm)

向を表す。入射波の来襲とともにFU-Sに作用する波力ベクトルが大きくなる様子が確認できる。また、揚圧力により斜面法線方向上向きの力が增大すると岸向きの波力も増大し始め、図中左上方向に大きな力が作用する。この状態でFU-Sが不安定になるものと考えられる。

(3) 数値計算による圧力場

図-11は数値計算により求めた押し波時の波動圧の空間分布の例である。FU-S層、透水斜面内に波動圧が伝達している様子がわかるが、汀線付近のFU-S層に等圧分布線の集中が確認できる。等圧線の集中はFU-S層の上下の圧力差が大きくなることを示しており、数値計算結果からも汀線付近のFU-Sの上下では間隙水圧差が大きくなり、それにとまって揚圧力が大きくなり、被害が発生すると言えそうである。

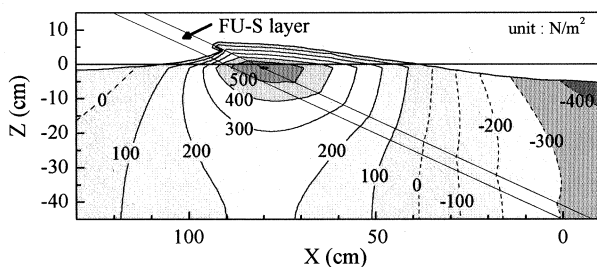


図-11 押し波時における波動圧分布の数値計算結果
(cotα=2.0, T=1.4s, H=10.5cm)

5. 袋型被覆材の耐波安定性に関する考察

(1) 袋型被覆材の移動状況

写真-2および写真-3はFU-Sの被害発生過程別の写真である。ただし、写真の上側が岸向き方向、下側が沖向き方向を表す。波高が小さい段階ではFU-Sに変動が無く(Rank-0)、波高が大きくなるにしたがってまず汀線より下のFU-Sが振動を始める(Rank-1)。更に波高が大きくなると、汀線より下のFU-Sが斜面に沿って下部に詰まり始め、汀線より上のFU-Sと汀線より下のFU-Sに若干の乖離が生じFU-Sの配置の連続性が失われる(Rank-2)。そして被害発生レベルの波高において、押し波により汀線前後のFU-Sがめくり上がり、引き波により転落する(Rank-3)。汀線近傍のFU-Sに作用する流速、および波力は、斜面法線方向に比べて斜面方向が卓越しており、そのためにRank-2のように斜面沖向き方向にFU-Sが詰まっていく現象が先にみられる。そして移動限界時の波によって汀線付近のFU-Sが、岸向きに大きな斜面方向流速の作用により、図-10に示したように揚圧力とともに斜面方向岸向きに大きな力が働くことで不安定な状態となり、FU-Sがめくり上がる。そして引き波による斜面方向沖向きの大きな流速によって、同

方向の大きな波力が不安定となったFU-Sに働くことで、FU-Sの転落(Rank-3)が発生となる。ただし、周期T=1.0sの場合はRank-3までは生じず、Rank-2の被害が拡大することによる被害発生であった。

重被覆の場合は、FU-Sを重ねて被覆しているため、波高が増大してもかみ合わせによりRank-2が発生しにくい状態となる。ただし、Rank-2が発生した後は単被覆と同様にRank-3が発生することによりFU-Sの被害発生となった。

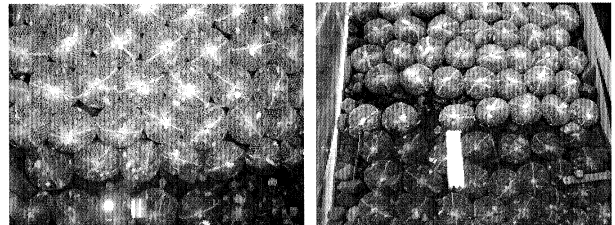


写真-2 Rank-2発生後の状況

写真-3 Rank-3発生後の状況

(2) 袋型被覆材の安定係数

傾斜堤の被覆材に働く波力に関してはこれまでに多くの研究がなされており、その中でも式(6)のハドソン式が広く使用されている。

$$M = \frac{\rho_r H^3}{K_D (\rho_r / \rho_w - 1)^3 \cot \alpha} \quad (6)$$

ここで、M：被覆材の最小質量、 ρ_r ：被覆材の密度、 ρ_w ：水の密度、H：設計波の波高、 K_D ：安定係数、 α ：斜面が水平面となす角度である。

図-12に、規則波下の各条件での被害発生より一つ前のレベルの波高より求めた K_D 値を示す。ただし、 K_D は式(6)のハドソン式におけるHを実験における入射波高を用いて評価して求めており、安定限界に対応する。

周期T=1.4s, 1.8s, 2.0sがRank-3の転落による被害発生であるのに対し、周期T=1.0sにおいては、Rank-2の状態が拡大して被害発生となっており、 K_D は他の周期

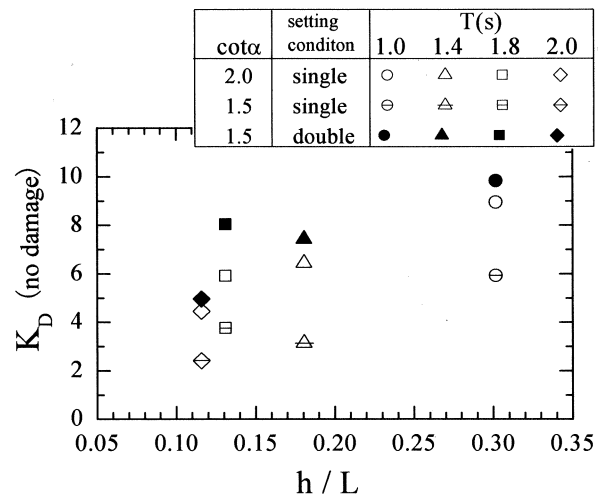


図-12 FU-Sの安定係数

と比べて大きく評価されている。 $\cot \alpha = 1.5$ の単被覆では K_D が低い評価となるが、重ねて被覆することで波高が増大しても上下のFU-Sの噛み合いによりRank-2が生じにくくなり、安定性は高くなる。

混成堤マウンド下での被覆材の耐波安定性に関する実験^{8), 9)}では短周期の波ほど被覆材の耐波安定性が低くなると報告している。これは重複波の節の位置がマウンドの法肩に近づくためである。混成堤マウンドでは初期被害の発生場所がマウンドの法肩であることが多いが、今回の実験のような一様斜面上では汀線付近が初期被害の発生場所となるため被覆材の初期移動形態が異なり、そのため周期にともなう被覆材の耐波安定性が混成堤マウンドの場合と異なると考えられる。今回の実験では、各条件とも、 $T=1.0s$ における安定性が最も高く、 $T=2.0s$ において安定性が最も低くなった。これは、汀線近傍において発生するFU-Sの底部と上面の間隙水圧差が $T=1.0s$ においては他の周期に比べて低くなっており、揚圧力が低いことで安定性が増していることに起因するといえる。

$\cot \alpha = 1.5$ の単被覆は通常施工されることはないのをそれを除くと全般的に K_D は約4.5以上であり、被覆捨石に比べて安定性は高いことがわかり、傾斜堤の斜面における被覆材としてFU-Sを使用することの有用性が指摘できる。なお、本実験は規則波を対象に行っているが、不規則波に対する実験結果からも被覆捨石に比べて K_D は大きくなることを確認している¹¹⁾。

6. 結論

本研究では透水性一様斜面上に設置したFU-Sに作用する流速、圧力、波力を計測し、また数値計算を用いることで、透水性一様斜面上に設置したFU-Sの移動機構について考究するとともに、透水性一様斜面上に設置したFU-Sの耐波安定性について検討した。得られた主要な結論は以下に示すとおりである。

- 1) 透水性一様斜面上に設置したFU-Sには、押し波、と引き波のそれぞれ斜面方向流速が正のピーク時と負のピーク時に斜面方向流速の2乗に比例した間隙水圧差に起因する揚圧力が作用する。
- 2) 透水性一様斜面上に設置したFU-Sに作用する斜面方向と法線方向のいずれの波力の最大値も斜面方向流速の2乗に比例する。
- 3) 透水性一様斜面上に設置したFU-Sには、揚圧力と同時に斜面方向にも流速の2乗に比例した斜面方向岸向きの波力が作用して不安定となり、引き波時に斜面方向流速の2乗に比例する斜面方向冲向

きの波力により、下方に移動する。

- 4) 数値計算により、押し波時の碎波によって汀線付近のFU-S層に等圧分布線の集中が確認でき、揚圧力が大きくなることを確認した。
- 5) 透水性一様斜面上に設置したFU-Sの安定係数 K_D は被覆捨石よりも大きくなることを示した。したがって、透水性一様斜面上であってもFU-Sを被覆材として使用することの有用性が確認できた。

参考文献

- 1) 出口一郎：フィルターユニット（砕石中詰め合成繊維袋），土木学会誌，vol.87，pp.44-47，2002。
- 2) 池谷毅：フィルターユニットの形状決定理論と水理設計への応用，海岸工学論文集，第49巻，pp.405-410，2002。
- 3) 久保田真一・小林茂高・松本朗・半沢稔・松岡道夫：消波ブロックの耐波安定性に及ぼす被覆層厚と中詰め材の影響に関する研究，海岸工学論文集，第49巻，pp.756-760，2002。
- 4) 久保田真一・松本朗・半沢稔・篠村幸廣・尾池宣佳・池谷毅・下迫健一郎：袋型根固め材を用いた混成堤マウンド被覆材の対波設計法，海岸工学論文集，第50巻，pp.776-780，2003。
- 5) 岩田好一郎・小山裕文・布藤省三：碎波後の波動エネルギーの変化に関する実験的研究，海岸工学講演会論文集，第30巻，pp.10-14，1983。
- 6) Golshani A. and Mizutani, N., Hur, D.S. and H. Shimizu: Three-dimensional Analysis of Nonlinear Interaction Between Water Waves and Permeable Breakwater, Coastal Eng. Jour., Vol.45, No.1, pp.1-28, 2003。
- 7) Hur, D.S. and Mizutani, N.: Numerical estimation of wave force acting on a three dimensional body on submerged breakwater, Coastal Engineering 47, pp.329-345, 2003。
- 8) Hudson, R.Y.: Laboratory Investigation of Rubble-Mound Breakwaters, Proc. ASCE, vol.85, WW3, pp.93-121, 1959。
- 9) 下迫健一郎・久保田真一・松本朗・半沢稔・篠村幸廣・尾池宣佳・池谷毅・秋山真吾：袋型根固め材を用いた混成堤マウンドの被覆材の耐波安定性と耐久性，港湾空港技術研究所報告，第43巻，pp.49-83，2004。
- 10) 松本朗・高橋重雄：流速場に基づく混成堤のマウンド被覆材の高度設計法，海岸工学論文集，第48巻，pp. 911-915，2001。
- 11) 島袋洋行・水谷法美・小山裕文：一様斜面上に設置した袋型被覆材の耐波安定性に関する研究，土木学会第61回年次学術講演会講演概要集，2006（投稿中）。