

袋型根固め材を用いた混成堤マウンド被覆材の耐波設計法

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****

合成繊維を使用した網材に中詰め石を充填した袋型根固め材 (FU) は、不陸に対応でき、急速に大量の施工が可能であることから、海域において非常に有効であると考えられるが耐波設計手法が確立されていない。そこで、FU を混成堤マウンド被覆材として用いた場合の耐波安定性を広範囲な縮尺での水理模型実験により明らかにした。FU の移動形態は作用流速の向きの影響を大きく受け、転動モードと滑動モードに分かれる。FU が変形して斜面を下側に転がり落ちる転動モードに対しては、中詰め石の移動を拘束した耐波型の安定性が標準型と比較して向上する。斜面上に沿って押し流される滑動モードにおいては、耐波型および標準型ともに同等の安定性を有する。

1. はじめに

袋型根固め材 (以降 FU と記す) は、合成繊維を使用した網材に中詰め石を充填したものである (写真-1)。これまで、河川堤防の浸食防護等の目的で広く用いられてきているが、波浪が主要外力となる海域においては、橋脚基礎工事で被覆工が施工されるまでの洗掘対策としてなど、仮設的な利用方法に限られているのが現状である (出口, 2002)。FU は大型の石材を必要としないこと、可撓性が大きく海底の不陸にも十分に対応でき水中作業が簡便になること、また急速に大量の施工が可能であることから、海域においても非常に有効であると考えられ、耐波安定性についての検討も行われている (秋山ら, 2001)。しかしながら、FU を海域に用いる場合の設計手法は確立されていない。

本研究は、こうした多くの利点を兼ね備えた 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、広範囲な縮尺での水理模型実験により、耐波安定性に関する詳細な検討を行ったものである。写真-1 に示す標準型 (河川を主体に従来から使用されているタイプ) と写真-2 に示す耐波型 (袋材の天端面と底面の中心を紐でつなぎ、袋材に張力を与えることで中詰め石の移動を拘束したタイプ) の 2 種類の FU を対象として検討した。まず、種々の設置条件における耐波安定性の変化の傾向を小縮尺 (縮尺 1/20) の水理模型実験によって把握した。引き続き、大縮尺 (縮尺 1/5) の水理模型実験を行い、より実海域に近い状態において FU の耐波安定性を確認した。また水理模型実験より明らかとなった FU の移動形態について、流速場の観点より考察した。

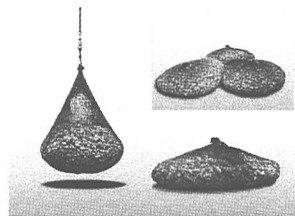


写真-1 FU (標準型)

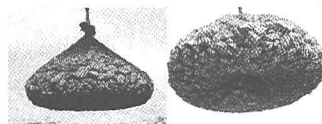


写真-2 FU (耐波型)

2. 水理模型実験

(1) 実験方法

a) 小縮尺実験

二次元造波水路 (長さ 55 m, 幅 1.2 m, 高さ 1.5 m) 内の勾配 1/30 のモルタル床上に、マウンド被覆材として FU を用いた縮尺 1/20 の混成堤模型を設置して行った。FU 模型として、標準型と耐波型の 2 種類を使用した。図-1 に実験断面への FU 設置の一例を示す。隣合う FU が重なりあわないよう、千鳥状に配列した。実験断面はマウンド上水深 d とマウンド天端幅 B を変化させ、種々の設計条件における FU の安定性について検討した。実験条件を表-1 に示す。

実験では、不規則波 ($T_{1/3}=1.79$ s, 2.46 s, 3.13 s) を作用させ、FU の挙動を観察した。FU の移動が生じないような小さな波から作用させ、波高を増加させて安定限界を把握した。同一波高レベルでの波の作用は 1000 波を標準とした。波高を増加させる際、FU の積み直しは行わず、被害個数はそれまでの被害個数に当該波高条件で新たに発生した被害個数を加えた累計数とした。本実験では、転落 (FU の大きさの 1 個以上移動)、移動 (FU の大きさの半分以上移動) およびめくれ上がり (FU の高さ以

* 正会員 工修 (株)テトラ テトラ総合技術研究所

** キョーフ (株)東京支店 土木資材部

*** フェロー 工博 鹿島建設 (株)技術研究所

**** 正会員 (独法)港湾空港技術研究所 耐波研究室長

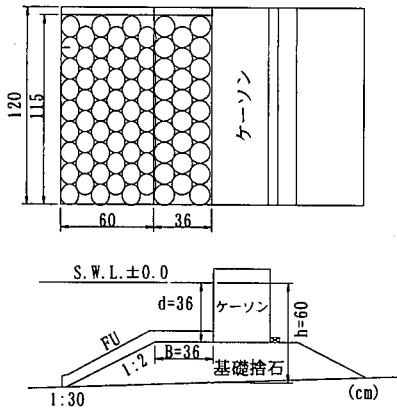


図-1 実験断面 (小縮尺)

表-1 実験条件 (小縮尺)

ケーソン天端高 h_c	波高条件ごとに $0.6 H_{1/3}$	
マウンド上水深 d	36.0 cm, 24.0 cm	
マウンド天端幅 B	36.0 cm, 54.0 cm, 66.5 cm	
法面勾配	1:2	
不規則波 有義波周期 $T_{1/3}$	修正 Bretschneider- 光易型スペクトル 1.79 s, 2.46 s, 3.13 s	
FU 模型 (縮尺 1/20 で 4 t 型に相当)	標準型	耐波型
質量 M	516.7 g	516.7 g
直径 R	12.8 cm	12.8 cm
高さ D	4.0 cm	4.0 cm
密度 ρ_r	2.6 g/cm ³	2.6 g/cm ³

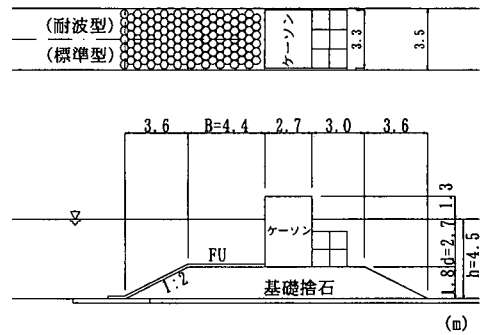


図-2 実験断面 (大縮尺)

表-2 実験条件 (大縮尺)

水深 h	4.5 m	
ケーソン天端高 h_c	1.3 m	
マウンド上水深 d	2.7 m	
マウンド天端幅 B	4.4 m	
法面勾配	1:2	
不規則波 有義波周期 $T_{1/3}$	修正 Bretschneider- 光易型スペクトル 5.0 s, 6.0 s, 7.0 s	
FU 模型 (縮尺 1/5 で 4 t 型に相当)	標準型	耐波型
質量 M	32.0 kg	32.0 kg
直径 R	51.0 cm	47.2 cm
高さ D	12.4 cm	13.1 cm
密度 ρ_r	2.63 g/cm ³	2.63 g/cm ³

の比 $B/L_{1/3}$ である。縦軸は式 (1) で定義される安定数 N_s である。

$$N_s = \frac{\rho_r^{1/3} H_{1/3}}{M^{1/3} (\rho_r / \rho_w - 1)} \quad (1)$$

ここで ρ_r は FU の密度、 ρ_w は水の密度、 M は FU の質量、 $H_{1/3}$ は作用有義波高である。

小縮尺実験の結果は無被害 ($D=0\%$) における安定数 N_s (被害の生じなかった最大の波高に対する安定数) を示した。大縮尺実験の結果は、無被害の安定数 N_s と被害

上のめくれ上がり) を被害 FU として計上した。

b) 大縮尺実験

実験は二次元造波水路 (長さ 184 m, 幅 3.5 m, 高さ 12 m) 内に、マウンド被覆材として FU を用いた縮尺 1/5 の混成堤模型を設置して行った。図-2 に実験断面を示す。FU 模型として、標準型と耐波型の 2 種類を使用し、マウンドの片面を標準型で、残りの片面を耐波型で被覆した。マウンド法肩上方 (側壁より 25 cm, マウンド肩 45 cm) に電磁流速計を設置し、水平方向および鉛直方向の流速を測定した。実験条件を表-2 に示す。実験では、不規則波 ($T_{1/3}=5.0$ s, 6.0 s, 7.0 s) を作用させ、FU の挙動を観察した。FU の移動が生じない程度の波から作用させ、順次波高を増加させて安定性を確認した。同一波高レベルでの波は、1000 波を標準とし、FU の中詰め石の移動や袋材の形状に顕著な変化がみられない場合は 500 波とした。被害の判断基準は小縮尺実験に準じた。

(2) 実験結果

安定実験結果を図-3 に示す。横軸は、マウンド天端幅 B とマウンド上水深での有義波周期に対する波長 $L_{1/3}$

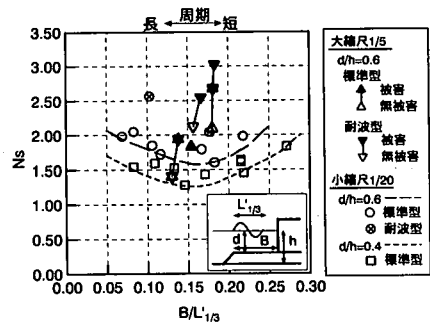


図-3 FU の安定数

の安定数 N_s (被害が生じた波高に対する安定数) を示し、実線で結んでいる。安定限界はこの間にあると考えられる。

a) 小縮尺実験結果

実験においては波高を漸増させているため、図-3に示した値がほぼ安定限界に相当すると考えられる。図中の破線は、 $d/h=0.6$ および $d/h=0.4$ の実験結果の平均的な安定数 N_s を示している。初期被害は、ほとんどのケースにおいて、マウンド法肩下に位置するFUで生じた。マウンド上水深が浅い場合 ($d/h=0.4$) に安定性が低下する傾向が見うけられるが、この傾向は他の被覆材においても見られるものである。標準型の N_s は $B/L_{1/3}=0.15$ 付近で極小値をとっており、 $B/L_{1/3}$ によって安定数が変化する傾向が確認された。この傾向は、FUに外力として作用するマウンド上の流速場と関係するものと考えられる。耐波型については、標準型と比較して安定性が向上することが確認された。中詰め石を拘束しているため、FUの形状に変化が生じにくく、安定性が向上すると考えられる。

b) 大縮尺実験結果

標準型については、小縮尺実験における $d/h=0.6$ の安定数とほぼ同様の値をとる。このことより、より現実に近い大縮尺実験において、小縮尺実験で得られた安定数の妥当性が確認された。初期被害は、マウンド法肩下の斜面に位置するFUにおいて生じている。短周期においては、耐波型の安定性が標準型と比較して向上する。長周期においては、耐波型および標準型ともに同等の安定性を有することが分かった。

3. FUの移動形態に関する考察

(1) FUの移動形態と作用流速

a) FUの移動形態

大縮尺実験における、FU移動状況の目視観測により、周期によってFUの移動の様相が異なることが明らかとなった。短周期では、図-4に示すようにFUの中詰め石が揺さぶりを受け、押し波時にFU形状が大きく変形すると引き波時に斜面下側に引きずられるように移動する。このため転がる作用を受けやすくなり、斜面を下向きに転がり落ちる移動形態 (転動モード) となる。標準型は中詰め石が移動することで変形するが、中詰め石の移動を拘束した耐波型の変形は抑制される。そのため、FU形状の変形が移動の要因となる転動モードにおいては、耐波型の安定性が標準型と比べて向上すると考えられる。長周期では、図-5に示すように、押し波時にFUがほぼ形状を維持した状態で斜面に沿って押し流される移動形態 (滑動モード) となる。このため中詰め材の拘束効

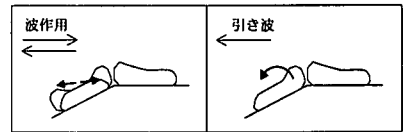


図-4 FUの移動形態 (転動モード)

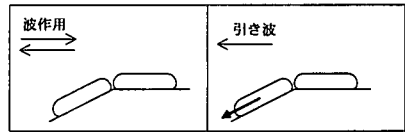


図-5 FUの移動形態 (滑動モード)

果の有無が安定性に寄与することではなく、標準型と同時に耐波型も押し流され、両者の安定性に差が生じないものと考えられる。このように移動形態の違いが、耐波型と標準型の安定性に差異を生じさせることが分かった。

b) FUの移動形態と作用流速の関係

図-6に大縮尺実験により得られたFU移動時のマウンド法肩における流速をホドグラフ (縦軸は鉛直流速 w 、横軸は水平流速 u) として示す。図中斜線は、マウンド斜面を示している。

短周期における転動モード ($B/L_{1/3}=0.181$) では、マウンド肩下の標準型が斜面下側に転がり落ちたが、耐波型に移動は見られなかった。この時、マウンド法肩近傍において水平に近い方向 (実線) に流れが生じていることがわかる。水平方向の流れのため、FUがゆすぶられると考えられる。長周期における滑動モード ($B/L_{1/3}=0.138$) では、マウンド肩下の標準型および耐波型が同時に、斜面下側に押し流されるように移動した。この時は、引き波時にマウンド斜面に沿った方向 (点線) に流れが生じている。図-7に示すように、この流れの向きは、転動モードおよび滑動モードの移動形態と符合する。FUの移動は作用する流速の大きさのみではなく、流れの向きと密接な関係があることが、流速データから明らかとなった。よってFUの移動を議論する場合には、FUに作用する流速の向きを考慮することが重要である。

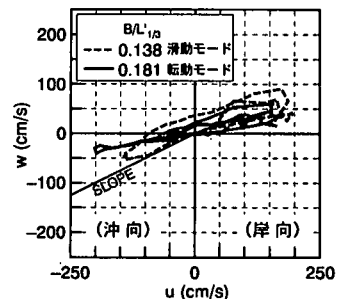


図-6 FU移動時の流速

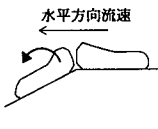
	長 ← 周期 → 短	
	滑動モード ($B/L_{1/3}=0.181$)	転動モード ($B/L_{1/3}=0.138$)
作用流速と移動状況		
安定性	耐波型＝標準型	耐波型＞標準型

図-7 移動形態と作用流速

(2) FU に作用する流体力

FUの移動限界を検討するには、FUに作用する流体力を精度よく見積ることが必要である。転動モードでは、FUの形状が時間的に変化し、流体力の作用状況が複雑に変化すると考えられる。そこで、ここではFUの安定限界についての基本的な知見を得ることを目的とし、FUの形状に顕著な変化を伴わない滑動モードを対象として、初期被害が生じるマウンド法肩下の斜面上に位置するFUに作用する流体力の評価を試みた。

マウンド法肩下のFUに作用する力を図-8に示す。マウンド斜面上に設置されたFUが、斜面下側に移動するのは、FU自重の斜面方向成分 $mg \cdot \sin \alpha$ とFUに作用する流体力 F の斜面方向成分 F_H の和が、摩擦抵抗力 $\mu (mg \cdot \cos \alpha - F_V)$ より大きくなる場合と考えられる。ここに、 mg はFUの水中重量、 μ はFUと捨石マウンドの間の静止摩擦係数である。

流体力 F をFUに作用する抗力として式(2)で与えることを考える。

$$F = \frac{1}{2} \rho U^2 \cdot C_D \cdot S \quad \text{.....(2)}$$

ここで、 ρ は水の密度、 U^* はFUに作用する流速、 C_D は抗力係数、 S は代表面積である。

しかしながら、上述したようにFUの移動は流れの向きの影響を大きく受けることから、FUへの流速の作用状況を勘案するとともに、FUが透過性の物体であるこ

とを考慮して流体力 F を評価する。

a) 流速の補正

FUへの流速の作用状況を考慮して流速の補正を行う。流速の補正の概念図を図-9に示す。マウンド上方にて測定された流速 U は、マウンド近傍において、法肩上FUの影響により流れの向きに応じて低減されると考えられる。そのため肩下FUには、低減された流速 U^* が作用すると考えられる。流速 U^* は、流速の低減率 ε_1 を用いて式(3)で与える。

$$U^* = \varepsilon_1 \cdot U \quad \text{.....(3)}$$

$$\varepsilon_1 = 1.0 - 0.5 \frac{A'}{A} \quad \text{.....(4)}$$

流速の低減率 ε_1 の定義を図-10に示す。低減率 ε_1 は、流れの向きにより定まるものとして、 $A'/A=1.0$ で $\varepsilon_1=0.5$ ($A'=A$ で流速半減)、 $A'/A=0.0$ で $\varepsilon_1=1.0$ ($A'=0$ で低減効果なし)とした。ここに A' は流向によって定まる領域で、図-10における斜線部の面積に相当する。 A はFUの断面積 ($D \times R$; D : 高さ、 R : 直径)である。流向によって定まる A'/A の値に応じて、 ε_1 を式(4)で与えることで流速を補正した。

b) 流体力作用領域の補正

流体力作用領域の補正の概念図を図-11に示す。マウンド法肩付近で、流れの向きに応じた遮蔽効果が生じた場合、肩下に位置するFUの流体力作用領域 A'' は、図-11における斜線部に相当すると考える。そこで流体力の低減率 ε_2 をFU断面に対して斜線部が占める割合として式(5)で与えた。

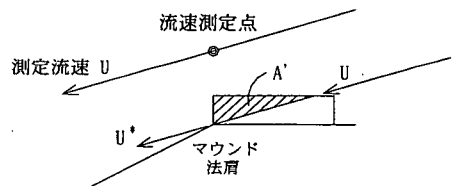


図-9 流速補正の概念図

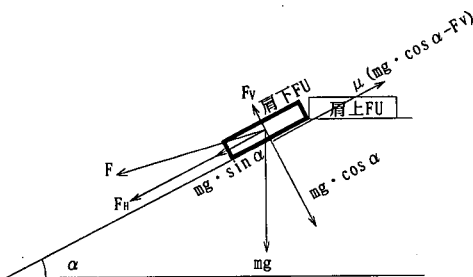
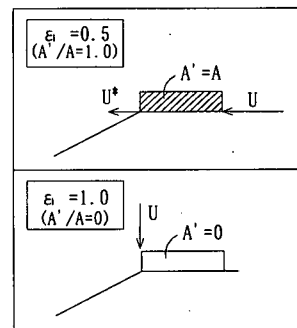


図-8 FUに作用する力

図-10 流速の低減率 ε_1

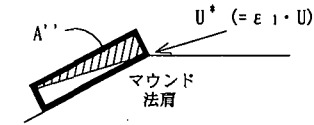


図-11 流体力作用領域補正の概念図

$$\varepsilon_2 = \frac{A''}{A} \dots\dots\dots (5)$$

以上 a), b) の補正より流体力 F を式 (6) により算出した。

$$F = \frac{1}{2} \rho (\varepsilon_1 \cdot U)^2 \cdot C_D \cdot D \cdot R \cdot \varepsilon_2 \dots\dots\dots (6)$$

(3) FU の移動限界

滑動モード時における, 移動に対する FU の安定限界を検討する。別途計測した FU の静止摩擦係数 $\mu (=0.7)$ を用いて摩擦抵抗力 $\mu (mg \cdot \cos \alpha - F_v)$ を算定した。摩擦抵抗力を FU 自重の斜面方向成分 $mg \cdot \sin \alpha$ と FU に作用する流体力 F の斜面方向成分 F_H の和で除し, FU の移動に対する安全率を求めた。安全率の定義を式 (7) に, 求められた安全率を図-12 に示す。なお流体力 F については, 抗力係数 C_D を 1.0 として算出した。

$$S.F. = \frac{\mu (mg \cdot \cos \alpha - F_v)}{mg \cdot \sin \alpha + F_H} \dots\dots\dots (7)$$

$B/L_{1/3} = 0.130$ は全て無被害の値で, $B/L_{1/3} = 0.136$ および 0.138 は全て被害の値である。安全率 1.0 を安定限界としては被害, 無被害とに区分されることがわかる。このことは, 作用外力の見積もり方法の妥当性を示すものであり, FU の移動メカニズムがコンクリートブロックなどの不透過性被覆材と本質的に異なることを示すものである。FU の移動時の作用流速を明らかにすることで, FU の安定限界を説明することが可能であると考えられる。FU の形状が時間的に変化する転動モード時の安定限界の検討については今後の課題としたい。

4. 結 語

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, 広範囲な縮尺での水理模型実験により, 耐波安定性に関する詳細な検討を行い, 以下の

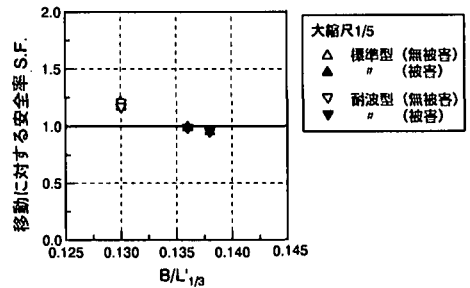


図-12 移動に対する安全率

結論を得た。

① FU を混成堤マウンド被覆材として用いた場合の安定数 N_s を明らかにした。波動場において, 中詰め石の移動を拘束した耐波型は, 標準型と比較して安定性が向上する事が確認された。

② FU の移動形態は入射波の周期によって異なり, 作用流速の向きの影響を大きく受けることが明らかとなった。周期が短い場合, マウンド法肩近傍において水平方向の流れが生じるため, 斜面を下向きに転がり落ちる移動形態 (転動モード) となる。周期が長い場合, マウンド法肩近傍において, 斜面方向の流れとなるため, 斜面に沿って押し流される移動形態 (滑動モード) となる。

③ 転動モードでは, 耐波型が標準型より安定である。転動モードにおいて, 耐波型の中詰め石の拘束効果が発揮される。滑動モードでは, 耐波型および標準型は同等の安定性となる。

④ FU への流速の作用状況および FU が透過性の物体であることを勘案することで, 流速場による FU の移動の力学的説明が可能となる。

参 考 文 献

- 秋山真吾・池谷 毅・今藤久夫・高橋 忍・石川芳一 (2001): フィルターユニットで被覆した緩傾斜護岸の耐波安定性, 海洋開発論文集, 17 巻, pp. 406-410.
- 出口一郎 (2002): フィルターユニット (碎石中詰め合成繊維網袋), 土木学会誌, Vol. 87, April, pp. 44-47.