

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

池 谷 毅*

フィルターユニット (FU) の形状を決定する基礎方程式を、膜材の力の吊り合い式、脚の交差角の変化を考慮に入れた網地の変形関係を基に導出した。得られた基礎方程式は、非線形方程式であり、境界条件は FU の底部と頂部の 2 点で与えられることから、数値計算手法を繰り返し適用して解を求めた。解析結果を実測データと比較した結果、FU の特長的な形状を良好に再現できることがわかった。また、この理論から、力学的に相似な FU を製作するために網地に求められる条件、網地の存在が中詰材の移動を拘束する効果について検討し、考察を加えた。

1. 序 論

フィルターユニット (写真-1 参照, 以下 FU と略す) とは、網袋に砕石や玉石等の粒状体を詰めた水工資材のことであり、砕石中詰め合成繊維網袋、砕石中詰袋体などと呼ばれることもある。FU は、可撓性を有するため、水底面とのなじみが良く、適度な透水性を有する。このため、主として洗掘防止用のフィルター材、河川護岸の法面被覆材などに適用されてきた。FU は施工性にも優れているため、最大 7 ノット (3.5 m/s) に達する強潮流下において建造された明石海峡大橋主塔基礎の洗掘防止工としても、活用されている (出口, 2002)。

これに対して、秋山ら (2001) は、FU を傾斜護岸の被覆材として利用することを目的に水理模型実験を行い、耐波安定性にもすぐれていることを明らかにした。耐波構造物として FU を用いる場合には、波浪条件に応じて種々の寸法の大型 FU を製造する必要がある。しかし、FU は使用材料、使用状況により形状が変化する構造で

あるため、形状がばらつきやすい。これらの課題を克服するためには、FU の形状がどのようなメカニズムで決定されるかを知ることが第 1 歩である。そこで、本研究では、標準的に用いられる丸型の FU (写真-1 参照) を対象に、その形状を解析する数学モデルを構築すると同時に、水理設計上必要となる情報をそこから抽出することを目的とした。

2. 材料とその特性

FU を構成する要素は、網袋と中詰材である。ここでは、それぞれについて、本研究に関連する事項を述べる。

2.1 網材料とその特性

網地の材料としては、麻などに代表される自然繊維やナイロン等の合成繊維が用いられる。一般には、FU の網地としては、強度、耐久性の観点から合成繊維が用いられる。

FU に使用する網の編み方は、以下の 2 種類が用いられる。

(1) ラッセル網: 結節部がレース編による編込みで作成され、安全ネットなどに用いられる

(2) 無結節網: 結節部がより合わせにより作成される方法で、防球ネット、ゴルフネットなどに用いられる
本論文では、信頼性、耐久性の面ですぐれるラッセル網を基本対象とする。

2.2 網地の構成と網糸の伸び特性

ここで考える網地は、図-1 に示すように、繊維を編んで束ねた網糸が結節され網目を構成するものである。結

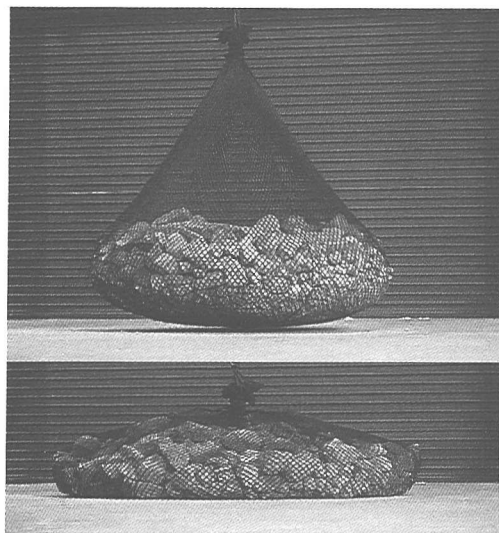


写真-1 FU の概形 (上: 吊上げ時, 下: 設置時)

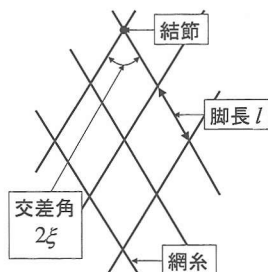


図-1 網の構成要素

節と結節との間を脚と呼び、この長さ(脚長)を l と書く。

脚と脚との成す角を交差角と呼び、半値を ξ と書く。

また、網糸の太さは d と表す。

網糸の張力伸び特性を調べるため、土研センター(1998)に示されている1本の脚に作用する張力 F と伸び δ との関係を調べた。ここで、伸び δ は伸びる前の脚長を l_0 として、次式で定義される。

$$\delta = l/l_0 - 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

図-2に破断時の最大伸び $\delta_{\max}$ で無次元化した伸びと最大張力 $F_{\max}$ で無次元化した張力との関係を示す。これを見ると、上記の無次元化により網の太さに関わらず、無次元張力と無次元伸びは、ひとつの関係式で表現できることがわかる。関係は、線型とはいえず、非線形性が顕著である。考えられる近似式を図-2中に示したが、ここでは、解析に使うことを考え、より簡便な以下の式を用いる。

$$\frac{F}{F_{\max}} = \left(\frac{\delta}{\delta_{\max}} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

2.3 中詰材の特性

FUの中詰材としては、粒状体が用いられる。通常用いられるのは、玉石と碎石である。材料を選択する際に最も重要となるのは、粒径である。中詰材の最小粒径は、網目から流出しない大きさで規定され、最大粒径は、FUを設置した場合の厚みに対して十分小さい大きさで規定される。すなわち、

$$\begin{aligned} \text{最小粒径} \quad d_{\min} &\geq 2l_0 \\ \text{最大粒径} \quad d_{\max} &\geq 0.1H_{FU} \end{aligned}$$

ここに、 H_{FU} ：FUの設置時の高さである。中詰材の粒径が大きすぎると、FUの形状がごつごつしたものになり、以降の連続体としての取り扱いが適用できなくなる。

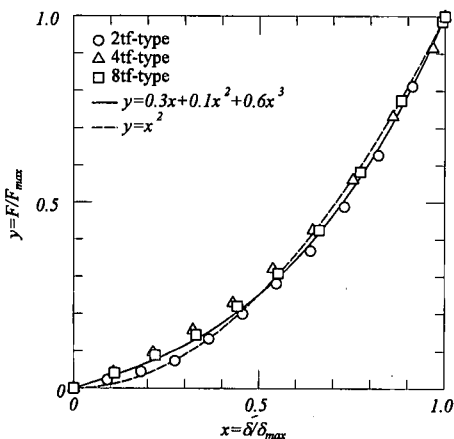


図-2 網脚の伸びと引っ張り力との関係

3. FU 形状決定理論

3.1 力の吊り合い方程式

網地は、脚の集合体であるから、力学上の取り扱いとしては、網地をケーブルネットとして取り扱うことが最も自然である。しかしながら、FUの場合、網の結節の数は、非常に数が多くなるため、工学的な取り扱いとしてはあまり有効なものとは考えられない。そこで、ここでは網地を膜材として扱い、理論を展開する。網地は、せん断、曲げには抵抗することができず、引っ張りに対してのみ抵抗力を有することから都合が良い。しかし、網はその変形の仕方が通常の膜とは異なることから、変形特性については、別途その特性を考慮する。

丸型のFUは、軸対象であることから、軸対象膜構造物の力の吊り合い方程式を基礎方程式として用いる(例えば、秋山, 1979)。座標系の定義は図-3によるものとする。

$$\frac{d}{ds_1}(T_1 r) - T_2 \cos \theta + p_1 r = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$-T_2 \sin \theta - \frac{T_1 r}{R_1} + p_n r = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 s_1 ：子午線方向の網地に沿った座標、 s_2 ：緯度円方向の網地に沿った座標、 T_1 、 T_2 ：それぞれ s_1 、 s_2 方向の網地単位長さあたりの断面力、 r ：緯度円の半径、 θ ：子午線の傾き、 p_1 、 p_n ：それぞれ s_1 方向、法線方向の外力である。

幾何学的な関係から、 s_1 、 s_2 方向の曲率半径である R_1 、 R_2 は以下の関係がある。

$$\frac{1}{R_1} = \frac{d\theta}{ds_1} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{1}{R_2} = \frac{\sin \theta}{r} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式(5)を式(4)に代入すると次式を得る。

$$-T_2 \sin \theta - T_1 r \frac{d\theta}{ds_1} + p_n r = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

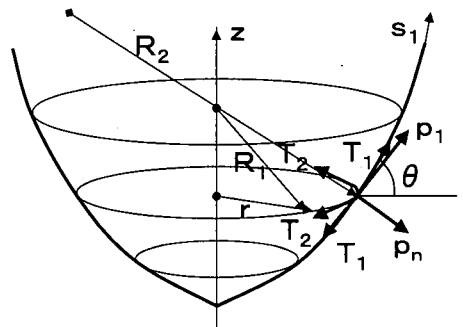


図-3 座標系・記号の定義図

3.2 歪・変位関係式

FUの変形は極めて大きいので、大変形まで解析できる理論を用いる必要がある。また、網材の変形は、網の目開き角の変化を考慮して求める。

はじめに、外力が作用していない網地の状態を考える。図-4に示すように、脚の伸びはゼロ、交差角は $2\xi=\pi/2$ であると仮定する。一般に、ラッセル網などでは、結節がわずかな長さを持つため、厳密にこの関係は正しくないが、簡便のため、上記を仮定をする。伸びる前の脚長を l_0 、変形した後の脚長を l 、目開き角を ξ と書けば、伸びる前及び伸びた後の s_1 方向の網地長さは、それぞれ、 $l_0/\sqrt{2}$ 、 $l \cos \xi$ と書ける。これから、伸び変形を考慮した軸対称変形は大変形理論により、次式が得られる。

$$\frac{dr}{ds_1} = \frac{\sqrt{2} l \cos \xi}{l_0} \cos \theta \quad (8)$$

$$\frac{dz}{ds_1} = \frac{\sqrt{2} l \cos \xi}{l_0} \sin \theta \quad (9)$$

また、式(1)、式(2)に示した脚の張力・歪関係をいれれば、伸びた後の脚の長さは容易に算出できる。なお、この式は、伸び変形を考慮した係留索の変形理論と同様の考え方に基づく式である。

また、FU 1 周の結節の数を M とすると、FU 1 周の長さとの関係から、次式が成り立つ。

$$2\pi r = 2Ml \sin \xi \quad (10)$$

3.3 断面力と張力との関係式

網地に作用する断面力と張力との関係を求める。図-5に示す脚の交差点における力の釣り合いより、次式が成り立つ。

$$T_1 = \frac{JF \cos \xi}{l \sin \xi} = \frac{JF}{l \tan \xi} \quad (11)$$

$$T_2 = \frac{JF \sin \xi}{l \cos \xi} = \frac{JF \tan \xi}{l} \quad (12)$$

ここで、 J は、網の多重度とする。多重度とは、ある点の荷重を支える脚数を4で割った数字である。網を2枚

重ねて使用する場合や、1節点に8本の脚が交差するような網の場合には $J=2$ となる。また、式(11)、(12)より、 ξ を消去すれば、張力と断面力とを結びつける次式を得る。

$$F = \frac{1}{J} \sqrt{T_1 T_2} \quad (13)$$

3.4 作用外力モデル

作用外力としては、中詰材の圧力、網材に作用する重力、網材と中詰材との摩擦力などを考慮する必要がある。粒状体と構造物との間の摩擦を考慮する構造物の例として、サイロがある。サイロ壁面に作用する摩擦力は、槽の深さが直径の1.5倍より小さいとき(浅槽の条件)には、土圧分布には影響しないとされる(例えば、日本建築学会, 1984)。FUの場合、明らかに浅槽の条件となるので、網材と中詰材との間の摩擦は考えず、土圧のみを外力として考慮する。

中詰材による土圧は、鉛直方向圧力 p_v と水平方向の圧力 p_h が異なる点に特徴があり、以下の式で表現される外力を考える。

$$p_v = p_0 + \rho g(H - z) \quad (14)$$

$$p_h = K p_v \quad (15)$$

ここに、 ρ : 中詰材のかさ密度、 g : 重力加速度、 H : 中詰材の厚さである。また、 K は土圧係数であり、Rankine 土圧式により以下のように評価する。

$$K = K_a = \frac{1 - \sin \phi_i}{1 + \sin \phi_i} \quad \text{主動状態} \quad (16)$$

$$K = K_p = \frac{1 + \sin \phi_i}{1 - \sin \phi_i} \quad \text{受動状態} \quad (17)$$

ここに、 ϕ_i は、内部摩擦角である。中詰材の状態により土圧計数を使い分けられることができる。また、 $K=1$ とすると、等方的な静水圧状態を表現することができる。

p_h 、 p_v は、それぞれ s_1 方向、法線方向の外力であるから、作用面の傾斜を考慮して、鉛直、水平圧力から換算すると、次式が得られる。

$$p_n = p_v(\cos^2 \theta + K \sin^2 \theta) \quad (18)$$

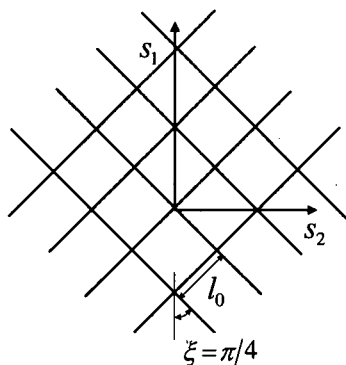


図-4 無応力状態の網地

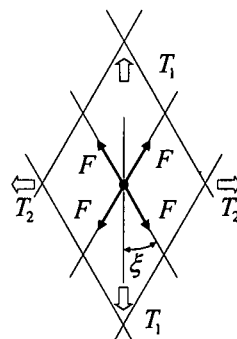


図-5 結節における力の釣り合い

$$p_1 = p_0(K-1) \cos \theta \sin \theta \cdots \cdots (19)$$

4. 解析方法

4.1 基礎方程式

基礎方程式となる式 (3), (7), (8), (9) は、いずれも s_1 に関する微分方程式である。求める変数は、 $T_1 r, \theta, r, z$ の4変数として、数値積分により求める。

4.2 境界条件

ここで、解析の対象とするのは、1) 吊り上げた状態 (据付作業を行う場合)、2) 設置した状態の2ケースを考える。

(1) 吊り上げた状態

吊り上げた状態では、中詰材は受動状態にあるとする。また、境界条件として以下を考える。

$$\begin{aligned} s_1 = 0 & : r = 1 \\ & z = 0 \\ & \theta = 0 \end{aligned}$$

$$s_1 = s_{\max} : r = l_0$$

(2) 設置した状態

設置した状態では、中詰材は主動状態にあるとする。また、境界条件は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} s_1 = 0 & : r = l_0 \\ & z = 0 \\ & \theta = 0 \end{aligned}$$

$$s_1 = s_{\max} : z = H_{FU}$$

ただし、設置面に網地が接触している状態においては、以下の接地半径 r_0 までは、 $p_n = 0$ とした。FUの接地半径は、FUの質量 Q が与えられたとき次式で計算される。

$$r_0 = \sqrt{\frac{Q}{\pi \rho g H}} \cdots \cdots (20)$$

4.3 数値解析方法

上記の通り、FUの形状を解析する問題は、非線形の連立微分方程式を2箇所での境界条件のもとに解析する問題となる。そこで、図-6に示すフローチャートに従い、繰り返し計算により、形状を求めた。

5. 解析結果

5.1 解析条件

形状を解析したFUの条件を表-1に示す。

表-1 解析条件

項目	条件	項目	条件
脚長 l_0	0.025 m	多重度 J	2
目数 M	170	かさ密度 ρ	1600 kg/m ³
脚破断荷重 $F_{\max}$	488 N	内部摩擦角 ϕ_i	$\pi/6$ (30°)
脚最大伸び $\delta_{\max}$	0.55	目標重量 Q	2 tf

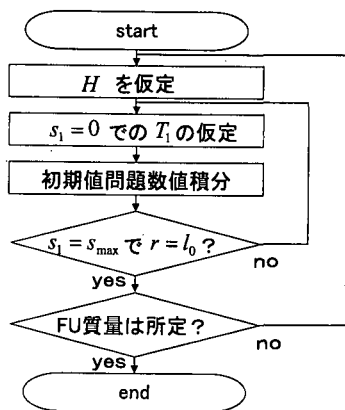


図-6 計算のフローチャート

5.2 解析結果

吊上げ状態、設置状態に対する解析されたFUの形状、脚交差角、脚張力の分布を図-7、図-8に示す。形状に関しては、写真-1から求めたFUの形状の実測結果を合わせて示している。これを見ると、吊上げ状態、設置状態ともに、おおむね良好に形状を表現できていることがわかる。特に吊上げた状態での形状は、円弧状の底と張り出しをもった側面を有する特色を良く表現している。

静水圧モデルを適用した場合には、底面、側面全体が一つの丸い形状となり、張り出しが形成されず、土圧理論を適用したことの妥当性が確認された。また、吊上げた状態の方が、設置した状態に比べて、最大半径が小さくなることも、解析からもよく分る。

脚交差角についてみると、上端、下端でともに小さくなり、最も半径が大きくなる場所で最大となる。また、張力については、吊上げ状態における張力は、設置時に張力に比べて著しく大きいことがわかる。この計算例では、7倍程度である。設置状態における網の張力は、破断に対して十分に余裕のあることがわかる。

6. 水理設計への適用

6.1 必要重量に応じた相似なFU

FUを耐波構造物に適用する場合、種々の重量を有する力学的に相似な袋体を準備することが重要である。模型実験に用いることを考えると、大きなものだけでなく小さなものも必要である。このとき、苦慮するのは網材の仕様の決定である。

網材の相似則については、網材の流水に対する抵抗の観点からの相似則について検討した例はある (中村, 1974)。しかし、FUの場合、形状を相似に保つ相似則が必要となる。ここでは、原型と模型に対する基礎方程式の比をとることにより相似則を考察する。網の特性に関

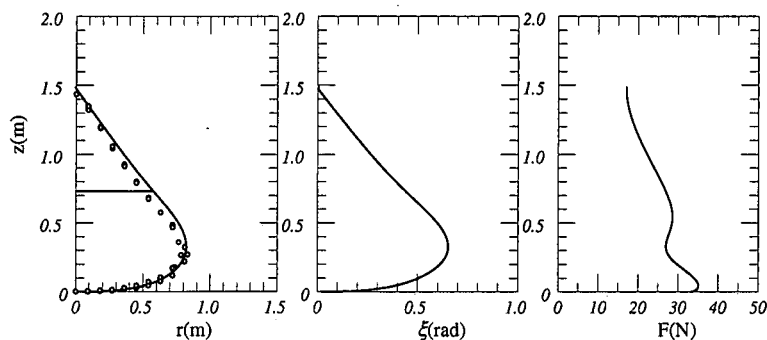


図-7 計算されたFUの形状(吊り上げ状態)

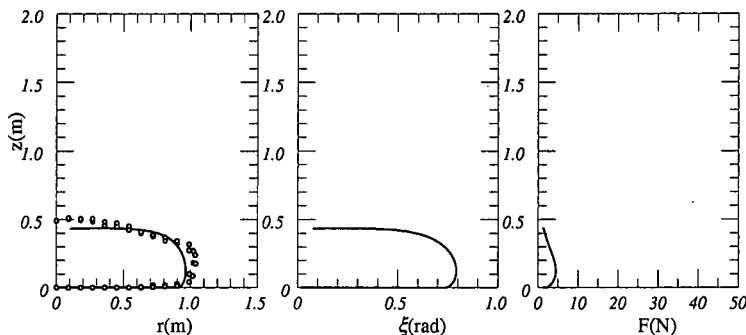


図-8 計算されたFUの形状(設置状態)

する式(2), 式(10), 式(13)以外の式は, フルード相似則を用いれば相似性が満足される。そこで, 式(2), 式(10), 式(13)を用いて, FUの形状を相似に保つための網を決定する法則を導く。

フルード相似則の幾何縮尺を λ_r とする。また, 多重度, 脚長, 目数, 網直径の縮尺をそれぞれ λ_d , λ_l , λ_m , λ_a と書く。式(10)より,

$$\lambda_m \lambda_l = \lambda_r \quad \dots\dots\dots (21)$$

なる関係式が得られる。また, 網脚の強度が網糸の直径の二乗に比例すると仮定すると, 式(2), 式(13)から, 次式が得られる。

$$\lambda_a^2 = \lambda_d \lambda_l^{-1} \lambda_r^2 \quad \dots\dots\dots (22)$$

式(21)と式(22)が力学的に相似なFUを製作するため, 網に求められる法則である。もし, 多重度, 目数を変化させないのであれば, さらに簡便に,

$$\lambda_l = \lambda_r, \quad \lambda_a = \lambda_r^{3/2} \quad \dots\dots\dots (23)$$

なる関係となる。例えば, 多重度と目数を変化させない場合, FUの重量を8倍(直径を2倍)にしようとしたら, 脚長を2倍, 網糸直径を $2\sqrt{2}$ 倍すれば, 力学的な相似性が保たれることになる。

6.2 中詰材の安定化効果

FUを耐波構造物に適用する場合, 中詰材が繰り返し

移動することにより, 網材が磨耗劣化する可能性がある。ここでは, 網が中詰材の移動を抑止する効果について考察する。網が中詰材を拘束する力は p_n で表現される。式(4), 式(5), 式(6)から, p_n と断面力, 曲率半径との関係を表す次式が得られる。

$$P_n = \frac{T_2}{R_2} + \frac{T_1}{R_1} \quad \dots\dots\dots (24)$$

この式で, 中詰材の移動を抑止するために, 網材法線方向の力 p_n を大きくするためには, 網材に作用する断面力を大きくするか, 曲率半径を小さくすることが重要であることがわかる。

7. 結 論

膜理論と大変形理論を用いて, FUの形状決定理論を導いた。吊上げ時, 設置時の形状を解析し, 計測結果と比較した結果,

中詰材の土圧の評価式が形状に大きな影響を与えることがわかった。

また, 相似な形状を作成するための網地の相似則について考察を加えた。さらに, 中詰材の移動を抑止するための方策を示した。

謝辞: ラッセル網の伸び特性については, キョーワ株式会社より貴重なデータの提供を受けた。ここに感謝の意を表します。

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, Vol. 17, pp. 406-410.
- 秋山成興 (1979): 弾性体の力学, 新体系土木工学, 第6巻, 土木学会編, 技報堂出版, 340 p.
- 財団法人土木研究センター(1998): 袋型根固め工用袋材, キョーワ式フィルターユニットI型・II型, 審査証明依頼者: キョーワ株式会社, 民間開発建設技術の技術審査・証明事業認定規程に基づく土木系材料技術・技術審査証明報告書, 技審証第1003号, 54 p.
- 出口一郎 (2002): フィルターユニット (砕石中詰め合成繊維網袋), 土木学会誌, 87巻, 4号, pp. 44-47.
- 中村 充(1974): 沿岸漁場の開発と防災, 水工学シリーズ74-B-5, 土木学会水理委員会, 28 p.
- 日本建築学会 (1984): 容器構造設計指針案・同解説, 日本建築学会。