

新構造汚濁防止膜の係留力に関する現地観測

田端竹千穂* ・清水勝義** ・播本一正**・相澤幹男***
平石哲也****・溝口忠弘*****・宮里一郎*****

1. はじめに

浚渫や埋立等の海洋工事では、濁った海水の拡散を防止するため汚濁防止膜が展張される。一般的に使用される汚濁防止膜はゴム製のフローターをつないでその下部に膜を取り付けた構造となっているため、高波浪中の耐波性能に問題があり、さらにゴム材が高価なため設置費用が高コストになる。また、汚濁防止膜は膜のふかれ変形など水理的に難しい問題を含んでいるため、これまで汚濁防止膜に作用する流体力や係留ロープに発生する張力に関して様々な研究が行われてきたが(例えば、樫木ら, 1990, 1991; 安ら, 1993; 前野ら, 1996; 青木ら, 1998), 実海域へ適応可能な設計モデルの実用化には至っていない。

上記の問題点を改善するため、筆者らは図-1 に示すようにフロート部を浮き玉とし、その端部を鋼製の円筒パイに接続させ、これにアンカーロープを張る新構造の汚濁防止膜(以下、新構造と略記)を開発した。この新構造防止膜は、浮き玉にワイヤーを通す構造になっているためテンション部の強度が向上しており、また浮沈式汚濁防止膜(以下、浮沈式と略記)に比べフレキシブル性に優れ、比較的安価になることが最大の特徴である。

筆者らは垂下型汚濁防止膜に関する水理模型実験を行い、その機能や効果についてすでに確認している(田端ら, 1999)。しかし、水理模型実験には縮尺効果や係留系の伸び特性に関する相似則の問題が残る。さらに、これまで高波浪下における現地観測事例が全くないことから、関西空港二期地区海域において現地観測を実施した。今回の現地観測には、各地に多大な被害をもたらした T 9918 号の観測結果も含まれており、汚濁防止膜の係留限界および張力算定モデルを検証するための有益な観測データとなっている。

本研究はそれら高波浪下の現地観測結果より、新構造

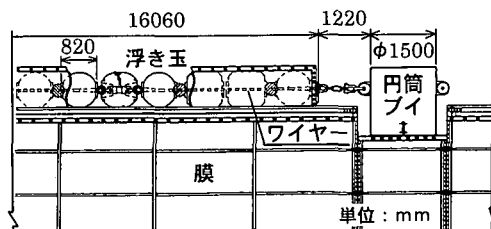


図-1 新構造汚濁防止膜

防止膜に作用する外力(波, 流れ)と係留ロープに発生する張力との関係について検討を行うとともに、水理模型実験により構築された張力算定モデルの現地適用性について検証を行うことを目的としている。

2. 現地観測概要

現地観測は、関西空港二期地区海域において、1999年9月23日～9月28日(台風期)、2000年1月29日～2月2日(第1回冬期波浪)ならびに2000年2月5日～2月10日(第2回冬期波浪)の計3回実施した。汚濁防止膜の設置水深は約20mとなっており、構造様式は膜幅15m、膜丈長5.0m、膜重量4.55 kgf/m (44.6 N/m)、ウェイト重量30 kgf/m (294 N/m)となっている。

現地観測位置および測定状況を図-2 に示す。測定は、汚濁防止膜のテンション部(J-0)とアンカーロープ(J-1, J-2)に作用する張力および浮体に作用する波浪と流れについて観測した。また、構造様式による発生張力の違いを確認するため、浮沈式のアンカーロープ(F-1, F-2)に作用する張力も同時に測定した。連続観測された波浪、流れおよび張力の観測データについては、それぞれ20分間をひとつのデータ整理単位とし解析を行った。ここで、波浪については最大波高(H_{max})、有義波高($H_{1/3}$)、有義波周期($T_{1/3}$)ならびに平均波向、流れについては平均流速(U_{ave})および平均流向を算出した。また、張力($Ten. = T_e + \overline{T_e}$)については、変動成分(T_e)と定常成分($\overline{T_e}$)を分離後、変動張力成分については一波ごとの波浪データに対応する張力変動から最大張力を求め、その値を統計処理することによって最大張力($T_{e,max}$)、1/10 最大張力($T_{e,1/10}$)、1/3 最大張力($T_{e,1/3}$)

- 本研究はそれら高波浪下の現地観測結果より、新構造
- | | | |
|-----------|----|---|
| * 正会員 | 工修 | 運輸省港湾局 技術課長 |
| ** 正会員 | | 関西国際空港株式会社 工務部設計課 |
| *** | | 運輸省第二港湾建設局千葉港湾工事事務所工務課
(前 関西国際空港株式会社 工務部設計課) |
| **** 正会員 | 工博 | 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室長 |
| ***** 正会員 | | 株式会社エコー 環境水理部横浜分室 |
| ***** 正会員 | 工修 | 株式会社エコー 環境水理部横浜分室 |

ならびに平均張力 (Te_{mean}) を算出した。ここでは、統計処理により求めた波高および張力データを用いて検討を行う際、有義波高および1/10最大張力 ($Te_{1/10}$) を用いている。また、最大波高および最大張力を用いる場合には、観測結果から得られた $H_{max}=1.8H_{1/3}$, $Te_{max}=1.7Te_{1/10}$ の関係より、適宜 H_{max} , Te_{max} を算出し検討に用いた。

3. 現地観測結果および考察

(1) 波、流れおよび張力の発生状況

各観測期間における波、流れおよび張力の時系列デー

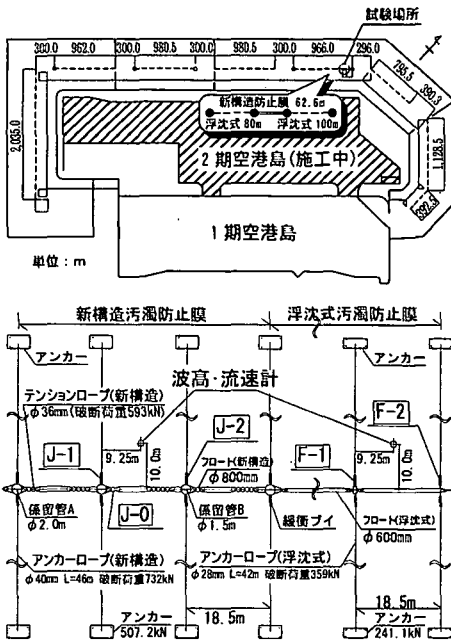


図-2 現地観測位置および測定状況

タを図-3に示す。各観測期間において高波浪が観測された時刻は、9月24日13時(有義波高3.06m)、1月31日6時(有義波高1.11m)、2月8日11時(有義波高2.32m)となっており、T9918号通過時に発生した最大有義波高(3.06m)が観測データ中に含まれている。

高波浪時の波向は、台風期でSW~WSW、第1回冬期波浪でWNW~NW、第2回冬期波浪でWが主となっている。平均流速に関しては、全観測期間を通じて最大約0.2m/sであり、平均流向は約6時間のサイクルでN系からS系またはその逆の変化を示している。

変動張力は、観測期間を通じ最大で約1.5tf(14.7kN)となっており、波高の増加に伴い張力も高くなる傾向を示す。また、定常張力は新構造で最大約1.4tf(13.7kN)となっており、変動張力と同程度の値を示している。ここで、新構造と浮沈式の定常張力を比較した場合、新構造に比べ浮沈式の方が全体的に高い値を示している。

次に、新構造防波堤に作用する外力(波・流れ)と張力の関係について整理する。ここで、観測データより張力の発生状況について検討した結果、流れにより緊張状態となった係留ロープに対し、新たに波が作用した場合に衝撃的な張力が発生することが確認された。これは、樺木ら(1990)や田端ら(1999)の水理模型実験においても指摘されている。したがって、波・流れと張力の関係を整理するに当たり、図-4に示すように $H_{1/3}$ と $Te_{1/10}$ 、防波堤に直角方向に作用する流速 U_x と $\overline{Te}$ について整理した。なお、波向・流向ごとにデータを区分し比較している。また、張力は2本のアンカーロープに作用する張力の平均値とした。

図より、有義波高と $Te_{1/10}$ は、テンション部およびアンカーロープともにほぼ線形的な関係を示している。一方、 U_x に関しては、両者の相関が全く見られない。膜

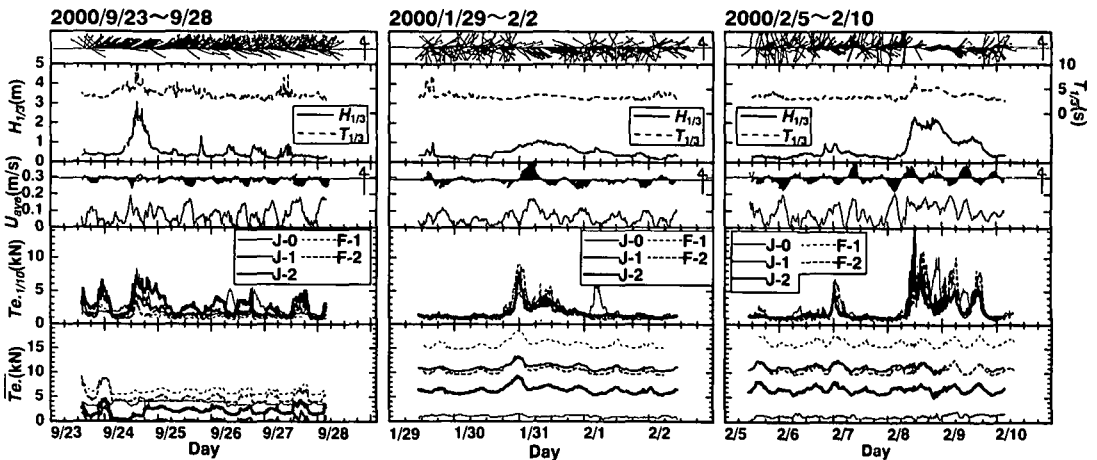
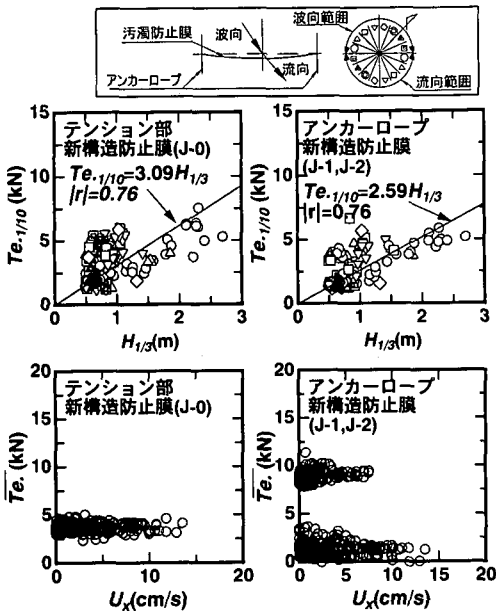


図-3 有義波高、有義波周期、平均流速、1/10最大張力および定常張力の経時変化

図-4 $H_{1/3}$ と $Te_{1/10}$ および U_x と $\overline{Te}$ の関係

の抗力は流速の2乗に比例して増加するが、今回の現地観測では流速値が小さいため、汚濁防止膜が十分に緊張する状態とはなっておらず、 U_x の変化に対し張力が一定値を示したものと考えられる。したがって、今回観測された張力は、波高の変化に伴う張力の変動成分が卓越していたものと判断される。

ここで、有義波高と $Te_{1/10}$ はほぼ線形的な関係を示しているが、同程度の波高に対し防止膜に直角方向に近い波が作用する場合、相関直線から外れる傾向を示す。このことから、変動張力の変化特性として、波高の変化に加え波向の変化により発生張力に違いが生じるものと推測される。

波の入射角度と変動張力の関係を図-5に示す。なお、変動張力は最大変動張力で無次元化している。汚濁防止膜に対する入射波向と変動張力は、図中の実線で示すようにほぼ $\cos^2 \beta$ に対応して低減している。

これまで、防止膜の耐波安定性に関して波・流れの作用力と発生張力の関係が主に議論されてきていたが、今

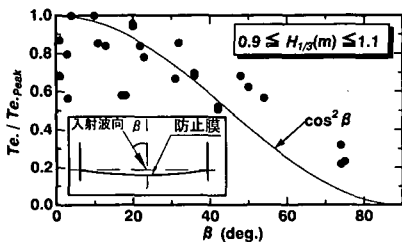


図-5 波の入射角度と変動張力の関係

回の観測結果から波向も重要なファクターと判断され、同程度の波高に対して入射波向が防止膜に平行に近くなるほど係留ロープに作用する張力が小さくなるものと判断される。

(2) 波・流れ共存場における張力特性

波・流れ共存場における張力との関係を総合的に評価するため、式(1)で定義される波と流れを足し合わせた2乗流速 u^2 を用いて検討を行った。

$$u^2 = \frac{H^2 g}{8d} \frac{1}{\cosh kh \sinh kh} \{ \sinh kh \cosh kh - \sinh k(h-d) \cosh k(h-d) + kd \} + \frac{\bar{U} H \omega}{kd \sinh kh} \{ \sinh kh - \sinh k(h-d) \} + \bar{U}^2 \quad (1)$$

ここで、 H は成分波ごとの波高(m)、 h は汚濁防止膜の設置水深(m)、 k は波数、 d は膜丈長(m)、 $\bar{U}$ は平均流速(m/s)、 ω は角振動数である。

2乗流速 u^2 と $Te_{\max}$ の比較を図-6に示す。図中の実線は、水理模型実験から得られた関係直線である。ここで、 $\bar{U}$ は汚濁防止膜に対し直角方向の流速に換算しており、 H は最大波高を適用している。なお、変動張力は入射波向 β の2乗に対応して低減することから、 H を求める際、式(2)から入射波向による波高補正を行った。

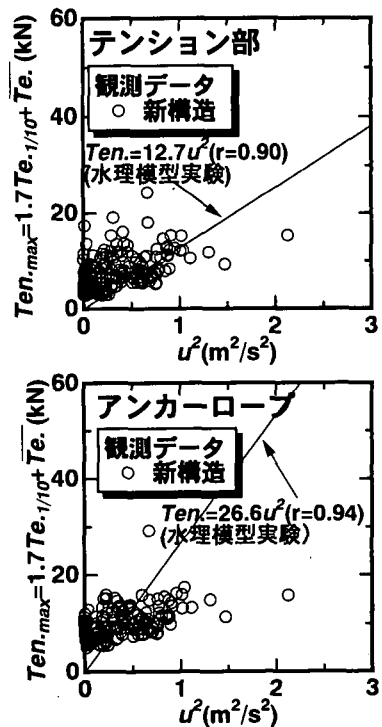


図-6 2乗流速と張力の関係

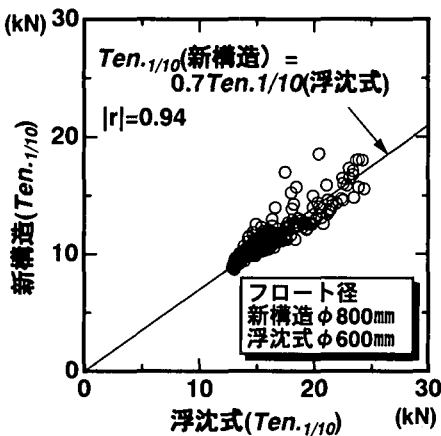


図-7 構造様式の違いによる張力特性

$$H = 1.8 H_{1/3} \cos^2 \beta \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

図によると、2乗流速 u^2 と最大張力はほぼ比例関係にあり、 u^2 の増加に伴って張力が増加している。また、水理模型実験結果とも比較的良く対応していることから、入射波向による波高補正の妥当性が確認される。

(3) 構造様式の違いによる張力特性

新構造と浮沈式の張力比較を図-7に示す。図中に示す張力は、2本のアンカーロープに作用する張力の平均値を用いた。図より、新構造と浮沈式の張力を比較すると、相關直線の傾きが0.7となっており、新構造のアンカーロープに作用する張力は浮沈式に比べ3割程度小さくなっている。新構造防止膜は浮沈式防止膜に比べフレキシブル性に優れており、耐波安定性が高いものと判断される。

特に、今回の現地観測では最大3.06mの有義波高が観測されており、この最大有義波高は関西空港二期地区海域に設置されている浮沈式の設計条件である有義波高2.5mを優に超える波高となっていた。新たに開発された新構造汚濁防止膜は、それら高波浪下においても非常に安定であったことから新構造防止膜の優位性が認められる。

4. 張力算定モデルの検証

田端ら(1999)は、垂下型汚濁防止膜のアンカーロープに作用する張力の簡易推定法として、フロートは水粒子運動と同じ運動をし、運動エネルギーが係留ワイヤーの弾性力が有するエネルギーに変換されるものとする新たな張力算定モデルを構築した(以下、新張力算定モデルと略記)。

水粒子の運動によるフロートの最大水平速度は次式で表される。

$$U_{\max} = \alpha u_{\max} + U = \alpha \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh kh}{\sinh kh} + \bar{U} \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここで、 α は不規則波の非線形性による水粒子速度の増加の割合で、ここでは $\alpha=2$ を採用した(平石ら、1997)。また、 $u_{\max}$ は波による最大水平速度である。フロートが有する運動エネルギーは次式で表される。

$$E = \frac{1}{2} m_B (1 + \kappa_B) U_{\max}^2 \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

ここに、 m_B はアンカーと係留点をつなぐアンカーロープ1本あたりのフロート質量であり、 κ_B は付加質量である。ここでは、改めて $(1 + \kappa_B)$ を質量係数 M とする。係留ロープの弾性エネルギーとの釣り合い方程式は以下のようになる。

$$E = \frac{1}{2} M \cdot m_B \cdot U_{\max}^2 = \frac{1}{2} K \chi_{\max}^2 \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

ここに、 K はアンカーロープの伸び率(N/m)で、 $\chi_{\max}$ はアンカーロープの伸び量である。上式で示した釣り合い方程式から $\chi_{\max}$ が計算できるので、 $Tu_{\max} = K\chi_{\max}$ として最大張力が計算できる。

図-8は、新構造防止膜の係留ロープに作用する張力データより新張力算定モデルに含まれる質量係数 M を求めた結果である。図中、縦軸は計算値と観測値の誤差を示している。誤差は、(計算値-観測値)/計算値として求めた。計算条件として、新構造のアンカーロープ長46mに対して伸び率は約890kN/mとなる。また、作用波高として最大波高を用い、式(2)に示す入射波向による波高補正を行った。

図に示すように、質量係数 M を0.2とすることで誤差が最も小さくなり、精度の良い計算が可能となる。ここで、水理模型実験より得られた質量係数 $M=0.5$ に比べ、現地観測より得られた質量係数は低い値を示している。このように、質量係数 M が異なる値を示した要因としては、1) 水理模型実験では、汚濁防止膜に対し直角方向の波・流れの場に対する結果であり、実海域では多方向の波・流れの場となっている。2) 水理模型実験と現地試験の相似則に関する問題、等がある。特に、水理模型実験に用いた係留ロープの伸び特性やフロート模型の縮尺効果の影響が大きいものと考えられる。

図-9は質量係数 $M=0.2$ とし、新張力算定モデルによる計算値と新構造防止膜の張力データを比較したものである。なお、アンカーロープ張力は2箇所の平均値とした。また、テンション部張力の算定に際しては、水理模型実験よりアンカーロープ張力 Tu とテンション部張力 T の張力比率が $T=0.6Tu$ となることから、アンカーロープ張力の算定結果に対し上式より張力を算出した。新張力算定モデルによる計算値と実測値を比較すると、テンション部およびアンカーロープともに比較的良く対

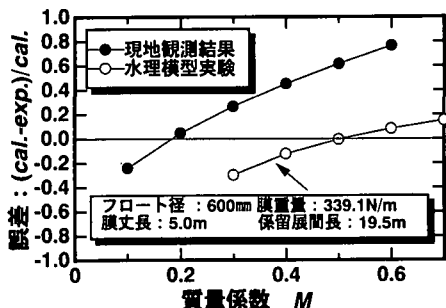


図-8 質量係数による計算誤差の変化

応しており、質量係数 $M=0.2$ とすることで新張力算定モデルは現地海域において適用可能と判断される。

5. おわりに

本研究では、高波浪下における現地観測結果より、新構造防止膜の水理特性および新張力算定モデルの現地適応性について検証を行った。今回の現地観測では、最大 3.06 m の有義波高が観測されたにもかかわらず、新構造防止膜は非常に安定であった。これは、新構造が浮沈式に比べ耐波安定性に優れているという点に加え、高波浪時の波向が汚濁防止膜に対し沿い波となっていたため、安定であった可能性が高い。言い換えれば、汚濁防止膜を設計する際、対象海域の高波浪時の波向・流向の特性を十分把握することが可能であるならば、より現地に適合した設計が可能となる。本研究から得られた主要な結論を要約すると以下のとおりである。

(1) 張力の変化特性として、波向が重要なファクターとなっており、波の入射角度と発生張力について検討した結果、張力はほぼ $\cos^2 \beta$ に対応して低減するものと判断された。(2) 入射波向により補正した波高と定常流速を足し合わせた 2 乗流速 u^2 と最大張力を比較した結果、水理模型実験で得られた相関直線と比較的良好に対応しており、入射波向による波高補正の妥当性が確認された。(3) 新張力算定モデルによる計算値と実測値を比較した結果、質量係数 $M=0.2$ を用いることで両者は比較的良好に対応し、今後、張力算定が可能となった。

最後に、本研究を行うにあたって、鳥取大学上田茂教授を座長とする検討会において貴重な御指導、御意見を賜った。ここに、委員各位をはじめ、関係諸機関に感謝の意を表す次第である。

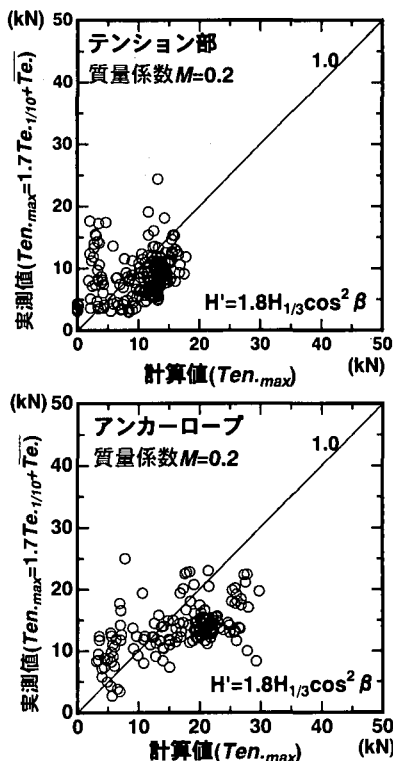


図-9 新張力算定モデルによる算定結果と観測結果の比較

参考文献

- 青木伸一・岡野 聡・榎木 亨 (1998): 自立式汚濁防止膜の有効高さおよび係留力の实用計算法, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 796-800.
- 安 成模・榎木 亨・青木伸一・萬藤 満 (1993): 波流れ共存場に設置されたオイルフェンスに発生する衝撃展張力と係留力の实用計算法, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 921-925.
- 榎木 亨・青木伸一・劉 海波・山下 真 (1990): 波浪中に張られた垂下式汚濁防止膜の展張ケーブルに発生する衝撃張力の特性, 海洋開発論文集, Vol. 6, pp. 311-316.
- 榎木 亨・青木伸一・劉 海波 (1991): 垂下式汚濁防止膜に発生する衝撃展張力のモデル化, 海洋開発論文集, Vol. 7, pp. 95-100.
- 田端竹千穂・八尋明彦・播本一正・相澤幹男・平石哲也・永松宏一 (1999): 垂下型汚濁防止膜の係留力に関する模型実験, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 846-850.
- 平石哲也・富田康大 (1997): 波浪による衝撃張力に対する浮標システムの安全対策, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 95-100.
- 前野賀彦・石川元康・田中克往・東 博之・川本博文 (1996): 現地観測に基づく汚濁防止膜の抗力係数に関する一考察, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 996-1000.