

津波による漁船等小型船舶の係留索に作用する 実用的な張力算定式の提案

Proposal of Practical Tension Formula for That has effect on the Mooring Rope of
Small Vessels like fishing boats by Tsunami

齋藤正文¹・伊藤孝²・中村雅博³・藤間功司⁴・嶋原良典⁴・三宅健一¹

Masafumi SAITO, Takashi ITO, Masahiro NAKAMURA,
Koji FUJIMA, Yoshinori SHIGIHARA and Kenichi MIYAKE

¹正会員 工修 財団法人漁港漁場漁村技術研究所 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-14-10)

²高知県水産振興部漁港漁場課 (〒780-8570 高知県高知市丸ノ内1-2-20)

³水産庁漁港漁場整備部 (〒100-8907 東京都千代田区霞ヶ関1-2-1)

⁴正会員 工博 防衛大学校システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

A measure against vessel-turned-driftage due to breakage of mooring ropes in large-scale tsunamis is in sore need in fishery districts susceptible to tsunamis. The present study attempted to clarify the nature of the tension to which the mooring rope of fishing vessels are subjected in tsunami in a hydraulic model experiment and calculated the characteristics of the mooring rope capable of withstanding the force of flow in tsunami on the basis of experimental models. In a further simulation study, additional rope modifications, method of tying and other mooring techniques were examined to enhance practicality of the use of the mooring rope.

Key Words : tsunami, mooring rope, fishing vessel, mooring capacity

1. はじめに

近年、太平洋側を中心とした我が国沿岸域では、東海・東南海・南海地震の発生とそれによる大規模な津波来襲の可能性が高いことから、その対策が急務となっている。大規模な津波の来襲が予測される漁業地域においては、係留索の破断による漁船の喪失、漁船が漂流物となって漁港内や漁港背後の陸域の人命や財産への間接的な被害を与える恐れが懸念されている。さらに漂流物は被災した漁港背後の陸域への海路からのアクセス障害となることもあり、漂流防止の効果的な対策が求められている。

漁船の漂流防止対策としては、第一義的には津波の流れに対して係留索を強固にすることが考えられる。しかしながら、係留索の特性(径、長さ、材質)、係留方法(津波の流れに対する漁船の向き)をどのように改良すればよいのか必ずしも明確ではない。既往の研究としては、中山、山本¹⁾が津波の流速が小さく水位変動が大きい場合に係留索に作用する張力は静的であるとして、浮力との釣り合いによる張力の計算方法を提案しているが、流速が大きく衝撃的な張力が作用するような場合は適用できない。

そこで本研究では、写真-1に示すような岸壁に係留されている漁船等の小型船舶を対象として、津波の流れに対して係留索に作用する張力の形態を水理

模型実験により明らかとし、張力と係留索を弾性体と仮定した解析モデルから津波の流れに耐えうる係留索の特性を算定できる実用的な張力算定式を提案することを目的として行なった。

さらに、津波漂流シミュレーションに張力算定式を導入し、漁船の係留策の特性や係留方法等の改善による漂流防止対策の効果を、視覚的に分かりやすく提示することを試みた。



写真-1 現地における船首1点係留の例

2. 水理模型実験による係留索の張力特性の検討

(1) 2点係留状態での係留索に及ぼす張力

図-1に示すように平面2次元水槽内に、漁港内の最も単純な係留状況の一つとして船首・船尾2点で岸壁に係留された状況を再現し、長周期の正弦波を作用させ、写真-2に示した船舶模型の挙動を観察するとともに、係留索に作用する張力を測定した。

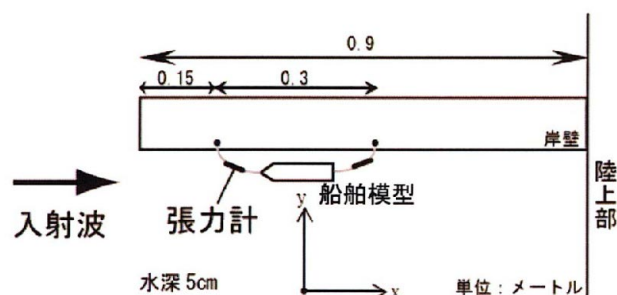


図-1 平面水槽における張力計測状況

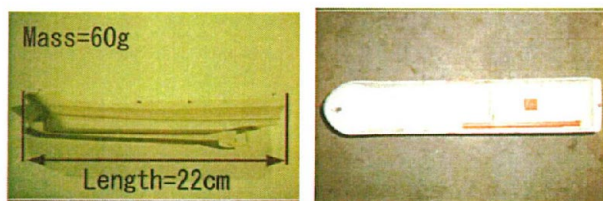


写真-2 船舶模型

実験に使用した船舶模型は、船体の長さは22cm、重心部分に粘土等のおもりを設置して調整し、質量は60gとした。平面2次元の水理模型実験は、防衛大学内の平面水槽で行い、水槽の諸元は、幅7m、長さ11m、深さ1.5mで、造波機はピストン式となっている。実験波の周期・振幅は表-1に示すとおりである。なお、()内の値は実験スケールを1/75とした場合の現地量に相当する。

表-1 実験波の諸元

	周期	振幅
CASE1	10s	1.3cm (98cm)
	(1分30秒)	1.9cm (143cm)
CASE2	15s	1.3cm (98cm)
	(2分15秒)	1.9cm (143cm)

実験では、係留索の長さは8cmとして、船舶模型と岸壁の固定点のほぼ中央付近に定格容量の1kg張力計を据え付けた。入射波に対して沖側(船首側)と岸側(船尾側)の係留索の張力を測定した。計測時は張力系の自重によって張力が発生することを防ぐため、沖側と岸側を別々に測定した。なお、水理模型実験の詳細は、嶋原ら²⁾を参照されたい。

図-2はCASE1周期10s、振幅1.9cmのケースにつ

いて、船首・船尾2点係留の状態における沖側と岸側の係留索に作用する張力の時間変化を示している。計測は5回行っており、すべての実験結果を表示している。船舶は、はじめに押し波によって岸側の方向へ移動し、沖側の係留索が伸びて張力が発生する(図-2のAに相当する)。一方、岸側の係留索はたわんでおり、張力は発生しない。次に、護岸からの反射波により、船舶は沖側へ移動する。そのとき沖側の係留索は緩み、逆に岸側の係留索は急激に伸びて張力が発生する(図-2のCに相当する)。このように、図-1に示す船舶の長手方向から津波が作用する場合、2点係留の状態でも係留索に最大張力が働く瞬間には一方が緩んでいる傾向にあるため、1点係留の状態とみなせることが明らかとなった。なお、図-2のBは、陸上部からの反射波の成分によって船舶が沖側へ移動する際に、張力計が船舶模型に接触した後一体となって斜め方向に移動して引張が生じたもので、津波の流れによる張力とは異なるものである。

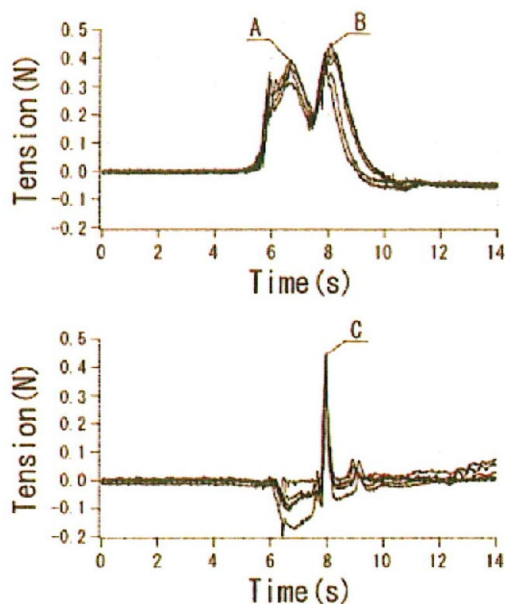


図-2 船首・船尾2点係留での張力の時間変化
(上：船首、沖側係留索、下：船尾、岸側係留索)

(2) 1次元定常流における水理模型実験

係留索に作用する実用的な張力算定式を導くために、1次元の定常流を作用させ、船首1点係留における船舶の係留索に働く張力と船舶の速度を求めた。

平面水槽同様に、水理模型実験は防衛大学内の断面水路にて行った。水槽の諸元は、長さ12m、幅0.4m、深さ0.3mである。張力の測定状況は、図-3に示すように、静水深10cmの水平床上の定常流場内に船首側を係留した船舶模型を初期位置から静かに下流側へ流して、係留索に働く張力と船舶模型の速度を同時に測定した。なお、水理模型実験の詳細は、平面水槽同様に嶋原ら²⁾を参照されたい。

定常流の実験は、表-2に示すように係留索を3

種類、係留の条件として船体質量および係留索の長さ、船体速度として定常流の流速および船体の流下距離を変更させて、全180ケース行った。ここで定常流の流速は実験スケールを1/75とすると4.3m/sに相当し、現地の津波流速のオーダーとなる。

表-2 定常流実験の実験条件

係留索の種類 Ea*	ROPE1(坪糸)	98.6N
	ROPE2(釣り糸6号)	98N
	ROPE3(釣り糸1.5号)	50N
係留の条件	船体質量	60, 90, 120g
	係留索の長さ	40, 50, 60cm
船体速度	定常流場の流速	40, 50cm/s
	船体の流下距離	5~30cm

*Eaは係留索のヤング率Eと断面積aの積

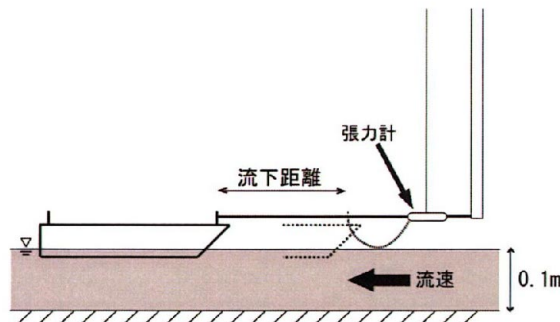


図-3 1次元定常流における張力計測状況

実験結果の一例として、図-4に係留索に働く張力と船体速度の時間変化を示す。これによると、係留策が流れによって自然に伸びきった時刻 $t=6.5s \sim 6.6s$ の間に衝撃的な強い張力が発生し、最大張力 T_{max} に達するまでに船体速度は急激に減少している。このことは、船体の運動量が係留索に力積を与えることにより、船体の運動は静止すると考えることができる。その後は定常流によって流体力を受け、張力は働き続けるものの、係留索が伸びきる瞬間の衝撃的な張力である T_{max} に比較すると十分に小さいことがわかる。

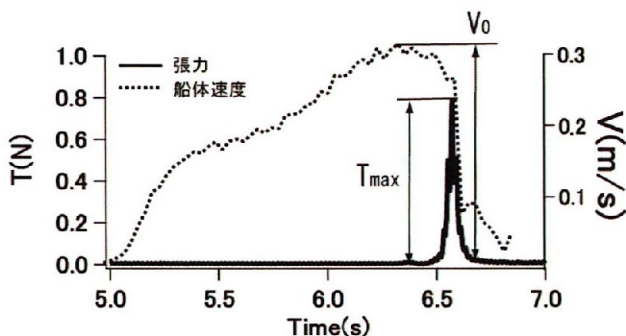


図-4 係留索に働く張力と船体速度の時間変化

3. 係留索に作用する張力の算定式

(1) 張力算定式

係留索によって繋がれた船体が津波の作用によって生じる運動を、1自由度のバネ・質点系の単振動モデルとして仮定した。

船体が係留索の自然長 l_0 に達するまで流され、その瞬間の船体速度を V_0 とすると、張力が最大となるのは、係留索の自然長からの変位が最大となるときである。最大張力を T_{max} とすると、実験結果と解析モデルより以下のような最大張力算定式を導いた。

$$T_{max} = V_0 \sqrt{\frac{Ea(m+m')}{l_0}} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 T_{max} は係留索に作用する最大張力、 V_0 は最大船体速度、 m は船舶質量、 m' は付加質量、 l_0 は係留索の長さ、 a は係留索の断面積、 E は係留索のヤング率である。付加質量は、付加質量係数を C_M 、船体の排水体積 V_r と水の密度 ρ とすると

$$m' = C_M \rho V_r \quad (2)$$

と表される。

張力算定式の妥当性を検証するため、水理模型実験の結果との比較をおこなった。図-5は、実験で測定された最大張力と式(1)より付加質量として球の場合に相当する $C_M=0.5$ と仮定した場合に求まる最大張力との比較を示しており、実験結果と算定結果は良好な一致を示している。

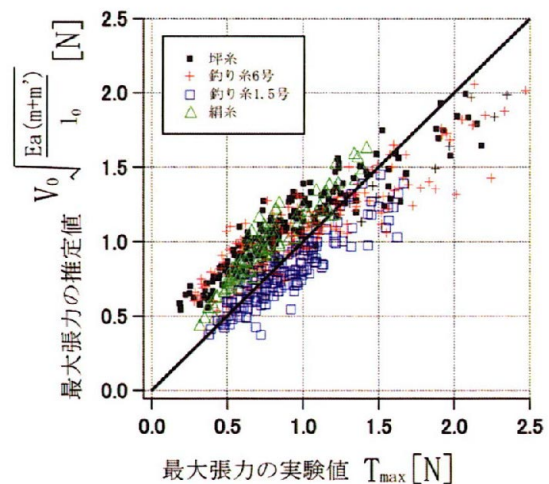


図-5 最大張力の推定値と実験値の比較

ただし、図-5では実験値の T_{max} が大きい範囲で、推定値が過小評価となっている。これは本算定式において T_{max} が大きくなるのは、船体が長い距離を流されることによって、最大船体速度 V_0 が大きくなることによるもので、このような場合は、船体の向きは必ずしも水路に平行になっていない可能性があり、船体と流れの向きを考慮して最適な付加質量係数を導入する必要があることを示している。なお、付加質量を考慮せずに $C_M=0.0$ とした場合は、 T_{max} が大きい場合において過小評価となることが鳴原ら²⁾によって報告されている。したがって、式(1)を実際の漁船

に適用する場合は、図-6に示すように漁船の横付けと縦付けと津波の流れの向きによって付加質量の取り扱いを変える必要がある。なお、「漁港・漁場の施設の設計の手引き」³⁾によると、漁船の接岸時の付加質量算定式を適用して以下ようになる。

横付け接岸

$$m' = \rho \frac{\pi D^2}{4} L \quad (3)$$

縦付け接岸

$$m' = \rho \frac{\pi D^2}{4} B \quad (4)$$

ここで、B は船体の幅(m)、L は船体の長さ(m)、D は喫水(m)を現す。

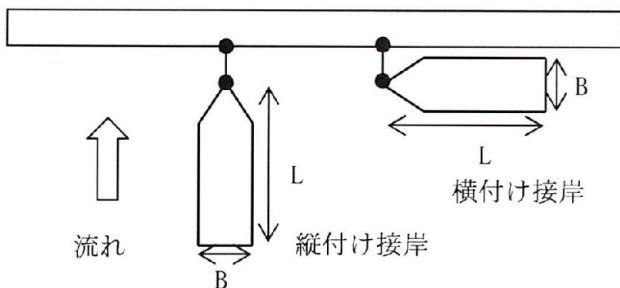


図-6 漁船の接岸状況

(2) 張力算定式の活用例

図-7では張力算定式の活用例として、津波の流速を $V_0=2.0\text{m/s}$ 、船舶の質量 3t、船舶は岸壁に対して縦付け係留、一般的に使用頻度の高い係留索であるクレモナを使用するとしてヤング率は $E=5 \times 10^8 \text{N/m}^2$ 、船舶速度は津波の流速に等しいと仮定し、津波の流速に耐えうる係留索の径の算定を行なった。図の横軸は係留索の径、縦軸は係留索の張力を示している。これによると、係留索の径が 22mm より小さい範囲では、係留索の破断強度は最大張力を下回っていることから、破断することを意味している。一方、係留索の径が 22mm 以上の範囲では最大張力よりも係留索の破断強度が上回っており、係留索が破断することはない。したがって、このような条件下では破断を防ぐために係留索の径を 22mm 以上とすることが必要である。

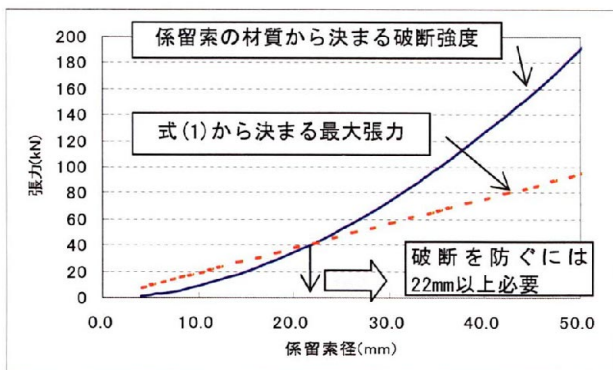


図-7 張力算定式の活用例

4. 津波漂流シミュレーションへの活用

(1) 津波漂流シミュレーションの概要

本章では、漁船1隻1隻ではなく、漁港内に複数係留された状態を想定し、漁船の係留策の特性や係留方法等の漂流防止対策を実施した場合に、どの程度の効果が現れるのかを把握することを目的として津波漂流シミュレーションを実施した。

津波漂流シミュレーションは、後藤ら⁴⁾⁵⁾の手法に基づくもので、津波伝播遡上シミュレーションの結果得られる時々刻々の水位や流速の予測値より、漁港内や漁港背後の陸域に存在する漁船等の船舶、漁業資材、乗用車等が漂流物となるかどうかの判定を行い、漂流物となる場合はその移動方向の予測、滞留場所等を予測するものである。

すでに水産庁⁶⁾では、宮城県気仙沼湾での津波によるカキ養殖筏と漁船の津波漂流シミュレーションを実施している。このときの漂流開始条件については、首藤⁷⁾を参考に、漁港内に係留された漁船については、その場所での津波の流速が一定値を越えた場合は漂流を開始するという条件が使用されている。

一方、本研究では漂流開始条件に張力算定式を導入した。すなわち、津波の流速と漁船の移動速度が等しいと仮定して係留索に作用する張力を推定し、使用している係留索の破断強度との比較により、張力が破断強度を上回れば漂流開始となる条件とした。

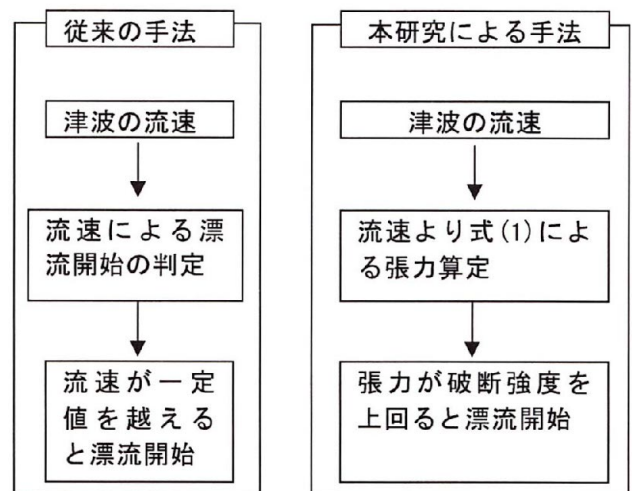


図-8 津波漂流シミュレーションによる漂流の判定

(2) 現地への活用

本研究では、宮城県波路漁港をモデルに明治三陸地震による津波シミュレーションと漁船の漂流シミュレーションを実施した。表-3は計算条件、図-9は波路漁港の水位変動を示している。水位変動は、第1波目は引波から来襲し、2波目がピークとなっている。

表-3 津波漂流シミュレーションの計算条件

解析モデル	津波：2次元非線形長波モデル 漂流：後藤モデル
差分スキーム	スタグガード・リーブフロッグ法
時間ステップ	2m 格子間隔の領域は 0.05s
潮位	S. W. L. =T. P. +0.72m

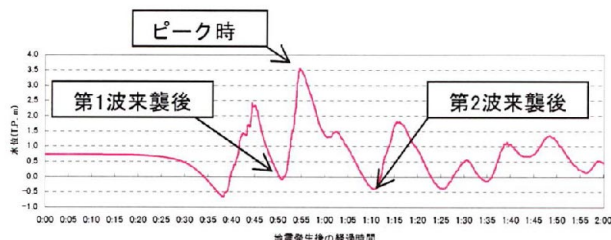


図-9 シミュレーションによる津波の水位

表-4は検討ケースの一覧で、CASE1 は従来の漂流開始の条件によるもの、CASE2, 3 および 4 は式(1)による係留索の張力により漂流開始の判定を行うものである。CASE2 は係留索の径を 30mm, CASE3 は係留索の径を 40mm としたものである。さらに CASE4 は、CASE3 を横付けと縦付けを入れ替えたものである。なお、漁港内に係留された漁船はすべて標準的な 3t 型を想定した。標準的な 3t 型の諸元は、 $L=9.0$ m, $B=2.4$ m, $D=1.4$ m, 重量は 29.43kN である。シミュレーションは津波の発生後から水位がピークに達した後の 1 時間 10 分について行なった。

表-4 津波漂流シミュレーション検討ケース

	漂流開始条件	備考
CASE1	流速 2m/s 以上	従来の手法
CASE2	式(1)による張力	係留索径 30mm
CASE3	が破断強度以上	係留索径 40mm
CASE4	となるとき	横付け→縦付け

図-10は津波作用前の漁船の初期位置を示している。

図-11は CASE1 のシミュレーションの結果で、従来の手法として、係留ロープの老朽化や不完全な係留に対応する条件として津波の流速が 2m/s 以上に達した場合に漁船は漂流を開始するとしており、漂流物となった漁船の軌跡を示している。CASE1 は、漂流を開始した漁船の数も少なく、移動範囲も漁港内に限られている。

図-12は、漁船の係留索の径を 30mm, 津波の流れを船の長さ方向で受ける状態(横付け)で係留されているときに、漁船の漂流状況を軌跡で示したものである。図-11の CASE1 と比較して漂流物の数も多く、漂流する範囲も漁港内から漁港外の広い範囲に渡っている。係留索の径 30mm の破断強度は 74kN で、式(1)より作用する張力が 74kN に相当する流速を求めると 1.6m/s で、CASE1 の漂流開始条件 2.0m/s を下

回っていることから、漂流を開始する漁船の数が増加したことになる。

図-13は係留索の径を 30mm から 40mm(破断強度は 127kN)に変更し、津波の流れを船の長さ方向で受ける状態(横付け)で係留された場合を想定している。

図-12と図-13を比較すると、漂流物となる漁船の数は減少し、漂流する範囲も狭くなっている。係留索の径を太くすることが漂流防止対策として効果があることを示している。



図-10 漁船の初期位置



図-11 CASE1による津波シミュレーションの結果



図-12 CASE2による津波シミュレーションの結果



図-13 CASE3による津波シミュレーションの結果

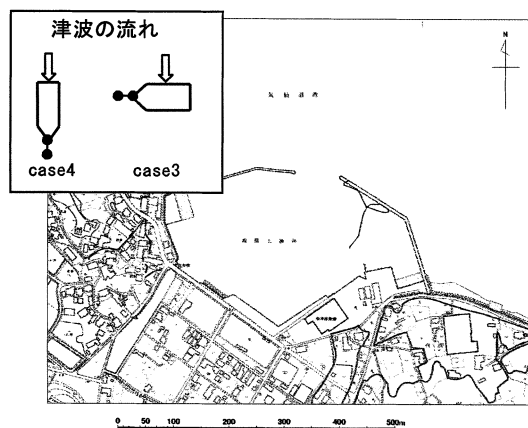


図-14 CASE4による津波シミュレーションの結果

さらに図-14は、係留索の径は40mmのまま、漁船の係留の向きを変更し津波の流れを船の幅方向で受ける状態(縦付け)を想定したものである。なお、CASE4の縦付けとは、図-14中に示したように、岸壁に対する縦付けではなく、津波の流れに対して船の幅方向で受ける状態である。CASE3と比較して、付加質量が小さくなり作用する張力が小さくなったことから漂流する漁船はごく僅かに限られている。

このように、式(1)の張力算定式を津波漂流シミュレーションの漂流開始条件として導入することによって、係留索の径を太くすることや係留方法を改善することが漂流防止対策として効果があることを具体的にかつ視覚的に判りやすく示すことが可能である。

5. 結論

本研究では、平面2次元および1次元定常流における水理模型実験により漁船等の小型船舶を対象に津波に対する挙動と係留索に作用する張力を系統的

にとりまとめ、実用的な張力算定式の提案を行った。

さらに、津波漂流シミュレーションに張力算定式により得られる張力と係留索の破断強度との関係を漁船の漂流開始条件として導入した。宮城県波路上漁港をモデルに明治三陸地震による津波漂流シミュレーションを実施して、漂流防止対策の検討を実施した。

主な結論は以下のとおりである。

- ・船舶が岸壁に横付けの状態では接岸された状態で、船の長さ方向から津波が入射する場合、2点係留の状態であっても、係留索に最大張力が発生する瞬間は、片側の係留索は緊張が緩み、1点係留の状態とみなしてよいことが明らかとなった。

- ・船舶が津波による流れを受ける際に係留索に働く最大張力の算定式を提案した。最大張力は、係留索の種類(材質)、係留条件、船体速度(津波の流速に等しいとする)より求めることができる。

- ・数値シミュレーション等により津波の流速を想定できる地域では、張力算定式により破断しない係留索の径が推定され、漁船の漂流防止対策として径を大きくする際の目安として活用できる。

- ・張力算定式による張力と係留索の破断強度の大小関係を漁船の漂流開始条件とした津波漂流シミュレーションを実施した。これにより係留索の径を太くすることや係留方法を改善する漂流防止対策の効果を以前よりも具体的にかつ視覚的に判りやすく示すことが可能となった。また、漁船の係留索・係留方法の改善だけではなく、漁船の係留位置や漂流防止策の配置位置の検討等にも適用可能と考えられる。

今後は、さらに筏等の養殖施設についても、適切な張力算定式を導くことによって、津波漂流シミュレーションに適用可能と考えられる。

参考文献

- 1) 中山哲蔵, 山本正昭: 津波による漁船の係留ラインの張力について, 水工研技報水産土木第6号, 1985
- 2) 鳴原良典, 藤間功司, 大久保暢之, 中村雅博, 坪田幸雄, 三宅健一, 齋藤正文: 津波時の船舶係留索に働く張力について, 地域安全学会論文集 No10, pp.387-392, 2008.
- 3) 水産庁: 漁港・漁場の施設の設計の手引き, 全国漁港漁場協会, pp.148-151., 2003
- 4) 後藤智明, 佐々木順次, 首藤伸夫: 津波による木材の流動, 第29回海岸工学論文集, pp.491-495, 1982.
- 5) 後藤智明: 津波による木材の流出に関する計算, 第30回海岸工学論文集, pp.594-597, 1983.
- 6) 水産庁: 災害に強い漁業地域づくりガイドライン, 2006
- 7) 首藤伸夫: 津波強度と被害, 津波工学研究報告第9号, 東北大学工学部災害制御研究センター, 1982