

## 津波時の船舶係留索に働く張力について（その 2）\*

鴨原 良典<sup>1</sup>, 藤間 功司<sup>1</sup>, 大久保 暁之<sup>1</sup>, 中村 雅博<sup>2</sup>,  
坪田 幸雄<sup>3</sup>, 三宅 健一<sup>3</sup>, 斎藤 正文<sup>4</sup>

### 1. はじめに

東海・東南海・南海地震津波が今世紀前半にも発生する可能性が高いことや、2004年のインド洋津波による被災状況からも、我が国の地震・津波への防災対策は急務な課題である。その中でも特に港湾区域においては、停泊している漁船や養殖筏、プレジャー・ボート等が津波によって転覆する直接被害のみならず、浮力により漂流物となった船舶等が沿岸構造物に被害を与える間接的被害が懸念されている。

通常、漁港や港湾区域に停泊している船舶は岸壁に係留することで沖に流されることを防いでいる。しかしながら、港湾内に浸入した津波は強い流れにより係留索を切断させると考えられ、その結果、船舶は津波によって陸側に押し流され構造物に衝突する。このようにして発生した被害は、津波の流体力のみによるものよりも大きくなることが予想できる。一方、引き波時は流れが沖向きに生じ漂流物は湾全体に拡散すると考えられる。図1は、水産庁<sup>1)</sup>が実施した気仙沼湾での津波によるカキ養殖筏と漁船の漂流シミュレーション結果であり、津波発生6時間後には湾

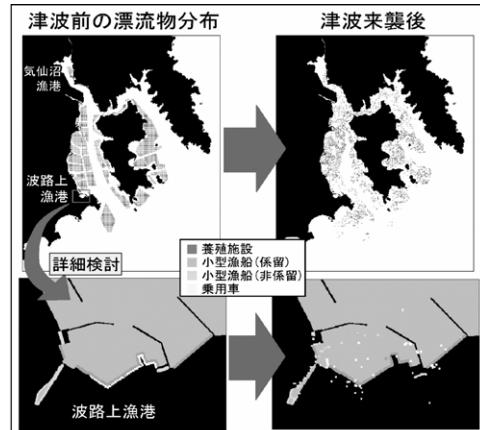


図1 漂流シミュレーション結果（水産庁）  
左図：初期状態、右図：初期状態から6時間後

全域に拡散していることがわかる。このように、漂流物が湾内に散乱すると船舶の航行に支障が生じることから、災害時の救援・復旧活動のための航行船舶に大きな障害を生じる可能性がある。

このような中で、水産庁<sup>1)</sup>は漁船・養殖筏等の漂流防止対策として、係留索を太くする等の係留方法の強化を挙げている。しかしながら、実際に係留索をどの程度太くすればよいか具体的に示すことは難しく、課題として残されている。したがって、沿岸部につなぎ止めている係留索に作用する津波の外力を把握することができれば、津波に耐えうる係留索を提案することが可能となる。

これまで、津波による漂流物に関する既往の研究としては漂流物の移動や陸上構造物に対する衝突力に関して行われており<sup>2), 3)</sup>、また、係留された船舶の動搖特性に関する研究は、タンカーなどの大型係留船舶の動搖特性やその衝突によって生じる係留設備の反力特

<sup>1</sup> 防衛大学校システム工学群建設環境工学科

<sup>2</sup> 水産庁漁港漁場整備部防災漁村課

<sup>3</sup> 財団法人漁港漁場漁村技術研究所第2調査研究部

<sup>4</sup> 財団法人漁港漁場漁村技術研究所第2調査研究部専門技術員

\*本論文は、地域安全学会論文集 No.10 に掲載された「津波時の船舶係留索に働く張力について」を加筆・修正したものである。

性を水理実験や数値解析によって明らかにしている<sup>4)-7)</sup>。

一方、漁船などの小型船舶については、中山ら<sup>8)</sup>が水理実験から係留方法の違いによる張力の発生パターンを整理しており、津波来襲時の有効な係留方法について検討している。また中山らは、津波の流速が小さく水位変動が大きい場合に係留索にはたらく張力は静的であるとし、浮力との釣り合いを考慮した簡便な張力の計算法を提案している。しかしながら流速が大きく衝撃的な張力がはたらく場合には適用できず、また、実用的な張力の推定式としては、津波や船体の速度、係留索の材質や太さ、長さなどの特性を考慮する必要があろう。

そこで本研究では、水理実験により津波時における船舶係留索の張力の特性を調べ、船体および係留索の諸量から簡易に評価できる動的張力の推定式を提案し、実験結果との比較からその妥当性について検証した。本推定式に想定津波の数値シミュレーション結果を反映させることで、船舶が漂流しないための適切な係留索の径が提案できる。

本手法を利用した津波による漂流物の拡散の防止は、津波発生後の港湾内での航路を確保することにも繋がる。結果として津波被害の軽減とともに漁業者の貴重な財産を守ることになり、さらには、災害救援・復旧等の地域安全活動に大きく寄与できることが期待できる。

## 2. 2 点係留状態の係留索に及ぼす張力

ここでは、船舶が岸壁に 2 点係留で接岸されている状況下において、津波のような長周期波動が作用した場合の船体の挙動と、それに対応する係留索の張力の詳細について調べることを目的として、2 次元平面水槽を利用した水理模型実験を実施した。

### (1) 実験水槽

水理模型実験は幅 7m、長さ 11m、深さ 1.5m の平面水槽を用いて実施した。水槽の一片にはピストン式造波装置があり、他の 3 辺は鉛

直壁で覆われている。

図 2 に実験装置の概要を示す。1/75 スケールを想定しており、深海域での伝播から沿岸部での浅海変形までを再現できる。沖合の水平床の水深は 62cm であり、水路床から水位を増幅させるために 1/3 斜面勾配を設け、水深 5cm の浅海域に繋げた。また、直立護岸の背後は平坦な陸地とした。

### (2) 実験方法

前述の実験装置に対し、造波板によって押し波初動の正弦波を発生させる。津波は深海域の沖側から浅海域に伝播することになる。入力波のパラメータは周期 10s, 15s、沖での振幅 1.3cm, 1.9cm とした。現地スケールにすると周期は約 1 分 30 秒、2 分 15 秒であり、波高 1.94m, 2.85m となる。周期は一般的な津波としては若干小さいが、沖での波は相対水深が 1/40 ~ 1/60 であるため長波として分類される。なお波高は一般的な津波の大きさである。

図 3 は護岸付近における計測器と模型の配置関係を示している。岸側には岸壁の木製模型を配置し、船首が沖側を向くように 2 点係留によって船舶模型を係留した（船舶模型等の詳細については後述）。係留索の長さは 8cm とし、その間に定格容量 1kg の張力計を結びつける。張力計の自重により張力が発生

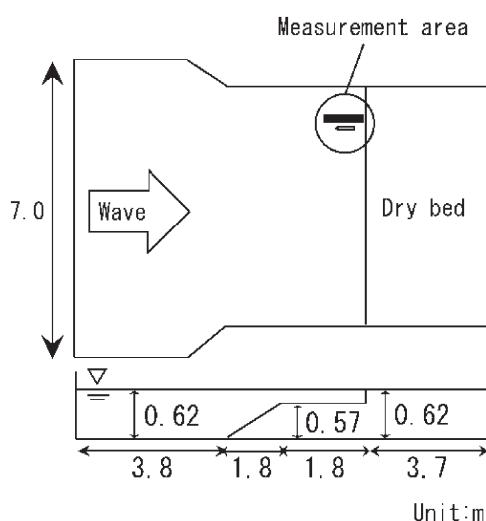


図 2 2 次元平面実験装置の概略

しないように上部から補助し、水平を保つようしている。

入力波の条件に対応して沖側（船首側）と岸側（船尾側）の係留索の張力を測定した。計測時における張力計の抵抗をできるだけ軽減するために、張力は沖側と岸側で別々に測定した。全てのケースにおいて試行回数は5回である。また、同時に船体の挙動を30フレーム／秒のデジタルビデオカメラにより撮影した。

### (3) 実験模型

船舶のモデルには漁船を模した木造の模型を利用した。写真を図4に示す。船首部は波が立たないように改良された波消しが取り付けてある。船体の長さは22cm、質量が60g

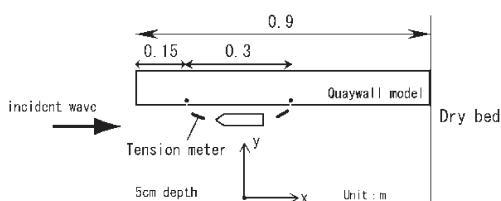


図3 2点係留下での張力計測の詳細

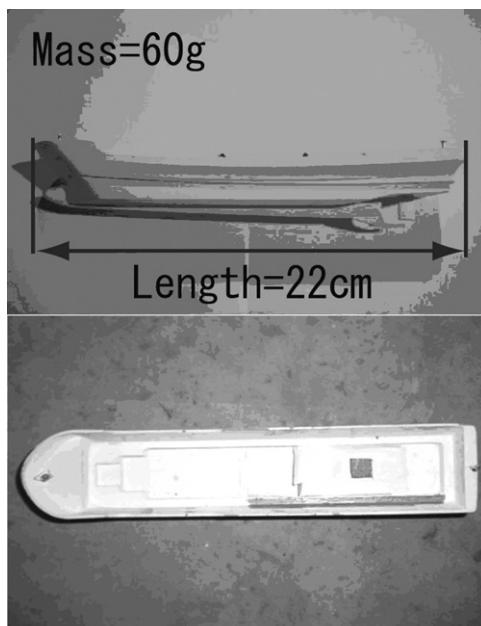


図4 船体模型（上：横から撮影、下：上から撮影）

であり、重心部に粘土等のおもりを載荷することによって質量を変えることができる。船首と船尾に取り付けられている釘に、係留索を模したナイロン糸を結びつけた。

### (4) 実験結果

実験結果として、図5に周期10s、振幅1.9cmのケースにおける沖側と岸側での張力の時間変化を示す。図中では試行回数5回全てをプロットしている。また、図6は同ケースの船舶模型の挙動の様子である。図6中のt=0.00sが初期状態であり、t=11.00sは水位が完全に引いた状態である。そして、t=6.60s、7.95sは図5において張力がピークを示す状態であり、両図中の記号A、B、Cがそれぞれ対応している。

はじめに、船舶模型は押し波によって岸側の方向に運ばれる(t=6.60s)。その際、沖側の索が伸び張力が作用していることがわかる(記号A)。一方で、岸側の索はたわんでしまうため張力はほとんど働かない。次に、t=7.95sでは未だ押し波が作用している状態であるが、護岸からの反射波の成分によって船舶模型は沖側に運ばれる。これにより沖側の索がたわみ、一方で岸側の索は急激に伸び、

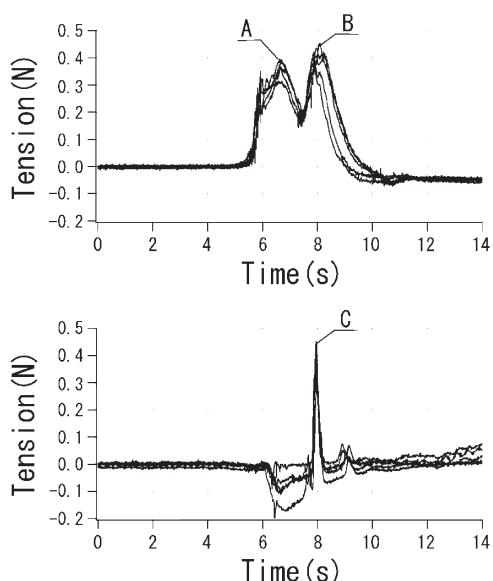


図5 2点係留状態での張力の時間変化（上図：沖側の係留索、下図：岸側の係留索）

張力が発生する（記号 C）。ピークの大きさは A とほぼ同じである。なお、同時刻では記号 B で示されるように沖側の索にも張力が生じているが、これは、反射波成分によって船舶が沖側に運ばれる際、張力計は船舶模型に接触した後一体となって斜め方向に移動し、その結果、引張りが生じている。したがって、張力計の設置条件に起因するため、津波の流れによって生じる張力とは本質的に異なる。

以上の結果から、岸壁に 2 点係留で接岸されている場合は片側の索のみが伸び、索に最大張力が働く瞬間には 1 点係留と等しい状態

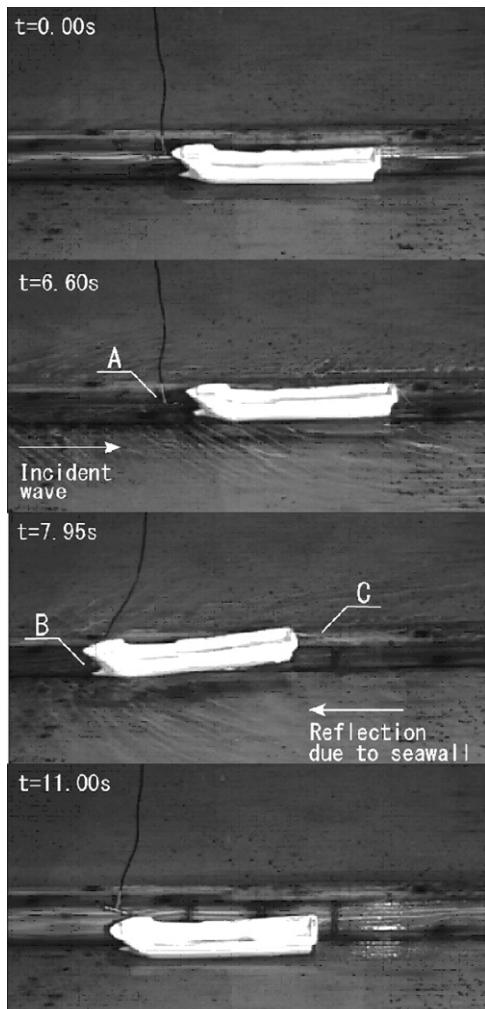


図 6 船舶模型の挙動

と見なすことができる。

### 3. 張力の推定式の提案と定常流実験による妥当性の検証

前章の結果を受けて、本章では津波により係留索に働く張力の簡易的な推定式を提案するために、船舶係留のモデルとして単純な 1 次元問題を考える。そして、船体と係留索に関連する変数をパラメータとして 1 次元開水路の定常流場における船体の速度と係留索の張力を測定する水理実験を実施する。さらに、実験結果との比較から、提案した張力の推定式の妥当性について検証することを目的とする。

#### (1) 実験方法

水理実験は長さ 12m、幅 0.4m、高さ 0.3m の定常流を発生可能な矩形断面水路を用いて実施した。水理実験の概要を図 7 に示す。静水深 10cm、水平床の定常流場に対し、船首を係留した船舶模型を初期位置から静かに下流に流し、その間、係留索に働く張力と船舶模型の速度の時系列を測定した。

張力の測定には定格容量 1kg の張力計を使用し、サンプリング周波数は 2,000Hz とした。一方、船体速度については、実験水路の上部から船体運動の動画をデジタルビデオカメラで撮影し、赤色のマーカーによって記した船体の重心位置を、運動解析ソフトウェア (DIPP-MOTION XD, ディテクト社製) を使用することにより算出した。

実験のパラメータとしては、表 1 に示すように係留索の材質（ヤング率と索の断面積と

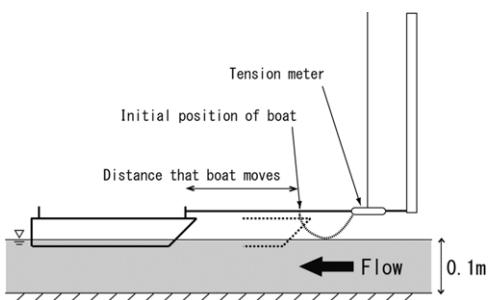


図 7 1 次元定常流実験の概要

の積  $E \times a$ ）を3種類、係留の条件（船体質量  $m$  と係留索の長さ  $l_0$ ）を5通り、そして船体速度（定常流の流速と船舶の流下距離）を12通り設定し、全180ケース実施した。さらに、各ケースにおいて試行回数は3回とし、実験の再現性を確認している。なお、定常流の流速は現地スケールでは最大約4.5m/sとなり、これは実際の津波流速とほぼ等しいオーダーである。

### (2) 係留索に働く張力と船体速度との関係

実験結果の一例として、係留索に働く張力と船体速度の時間変化を図8に示す。この図から、係留索が自然長に伸びきった時刻  $t=6.5s$  から  $6.6s$  の間に衝撃的な強い張力が働いていることがわかる。張力  $T$  がピークを示すまでに、船体速度  $V$  は急激に減少する。すなわち、船体の運動量が係留索に力積を与えることにより、船体の運動が静止すると考えることができる。 $t=6.6s$  のあとは、定常流によって起因する流体力を受けることにより、係留索には張力が働き続ける。しかしながら、係留索が伸びきる瞬間の衝撃的な張力（図8中の  $T_{max}$ ）に比べると十分に小さい。

また、図9は、係留索に与えられる力積

表1 定常流実験の実験条件

係留索の種類 $Ea(N)$	乾燥時		湿潤時
	Rope1(坪糸)	98	98.6
Rope2(釣り糸6号)	99.2	98	
Rope3(釣り糸1.5号)	49	50	
Rope4(縄糸)	176.5	65.75	
係留の条件	船の質量(g)	60, 90, 120	
	係留索の長さ(cm)	40, 50, 60	
船体速度	定常流の流速(cm/s)	40, 50	
	船体が流れる距離(cm)	5, 10, 15, 20, 25, 30	

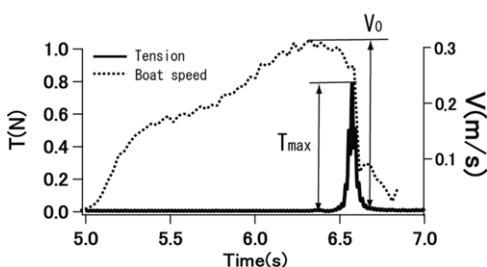


図8 係留索に働く張力と船体速度の時間変化

と船体の運動量  $mV_0$  との比較を示している。ここで、力積は張力  $T$  が増加し始めた時刻から減少し始めた時刻までを区分求積法によって数値積分している。また、 $V_0$  は図8中で示すような船体速度の最大値である。図9から、係留索の力積は船体の運動量と同じオーダーを示しており、本実験の張力の計測が妥当であるといえる。

### (3) 係留索に働く張力のモデル化

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考える。船体が係留索の自然長  $l_0$  になるまで流され、その瞬間の船体速度を  $V_0$  とすると、張力  $T$  が最大になるのは係留索の自然長からの変位が最大になるときである。以上の関係に係留索を弾性体と仮定した場合の応力・ひずみの関係を考慮することで、以下に示すような最大張力の推定式が導かれる。

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

ここで、 $T_{max}$  は最大張力、 $V_0$  は船体速度、 $m$  は船体質量、 $l_0$  は索の長さ、 $a$  は索の断面積、 $E$  は索のヤング率である。また、 $m'$  は付加質量であり、船体の排水体積  $V_r$  と水の密度  $\rho$ 、付加質量係数  $C_M$  により

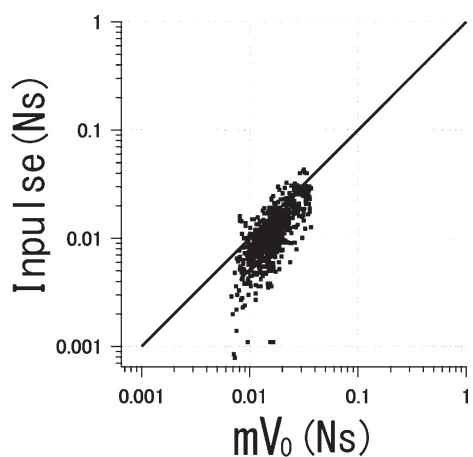


図9 船体の運動量と係留索に働く力積との関係

$$m' = C_M \rho V_r$$

[2]

と表される。

#### (4) 実験結果との比較による推定式の妥当性

式 [1] によって推定された張力と水理実験から得られた張力を比較したのが図 10 である。ここでは、付加質量係数  $C_M$  を球の場合における 0.5 と仮定している。推定式から求めた張力は全体的には実験値と良好な一致を示しており、本研究で提案した評価式は、津波の流れによって係留索に働く最大張力を推定するのには有用であるといえる。

ここで注意すべきことは、実験値の  $T_{max}$  が大きい範囲において推定値が過小評価になっていることである。本実験において  $T_{max}$  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  $V_0$  が大きくなるような場合である。この時、船体の向きは水路に平行にならない可能性があり、付加質量係数を球と仮定したものよりも大きくしなければならない可能性がある。付加質量  $m'$  の違いによる推定値への影響を明らかにするため、 $C_M=0$  とした場合の実験値との比較を図 11 に示す。先に述べた通り、特に  $T_{max}$  が大きい場合において過小評価の度合いがより大きくなっていることがわかる。一方、 $T_{max}$  が小さいときには、 $C_M=0.5$  とした場合よりも実験値と推定値はよく合致している。 $T_{max}$  が小さい実験ケースは、船舶の移動距離が短く  $V_0$  が小さいため、船体が流れに平行なままで  $C_M$  が 0.5 よりも小さいと解釈できる。このことからも、提案する推定式には付加質量は必要であり、また付加質量係数  $C_M$  は船体の向きに大きく依存する。

また、係留索の物理的特性によって推定値が大きく異なる場合がある。図 12 は絹糸での乾燥状態における実験値との比較であり、湿潤状態に比べ过大評価となっていることがわかる。このように、係留索の種類によっては海水に浸かっているかなどの条件によってヤング率  $E$  が大きく異なることも考えられるため、本推定式を適用する場合には実際の

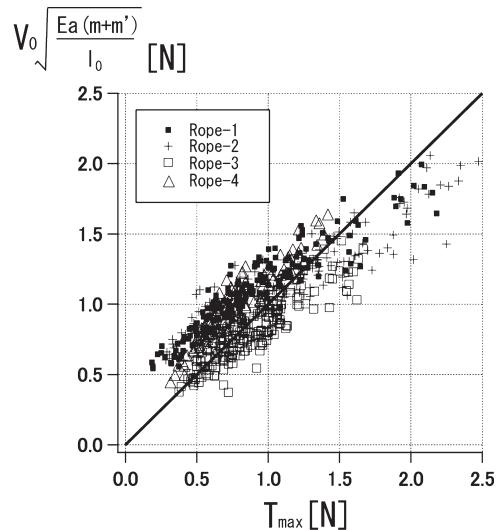


図 10 最大張力に関する実験値と推定値の比較 ( $C_M=0.5$ , 湿潤状態)

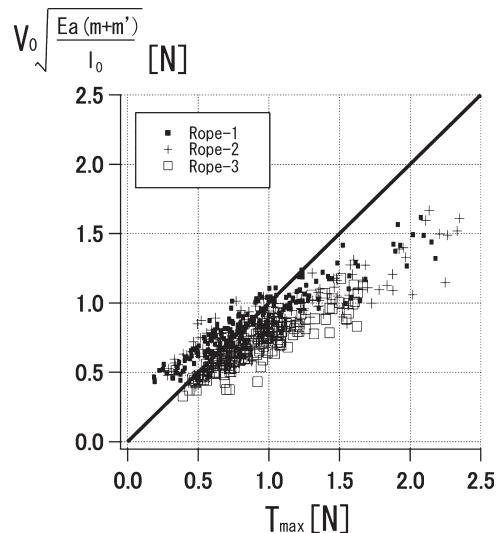


図 11 最大張力に関する実験値と推定値の比較 ( $C_M=0.0$ , 湿潤状態)

船舶の係留状況をあらかじめ調べておく必要がある。

#### 4. 張力の推定式の利用—実際の津波に耐えうる係留索の径の決定—

本研究で提案した推定式は実際の船舶の係留状況や、津波数値シミュレーションから得

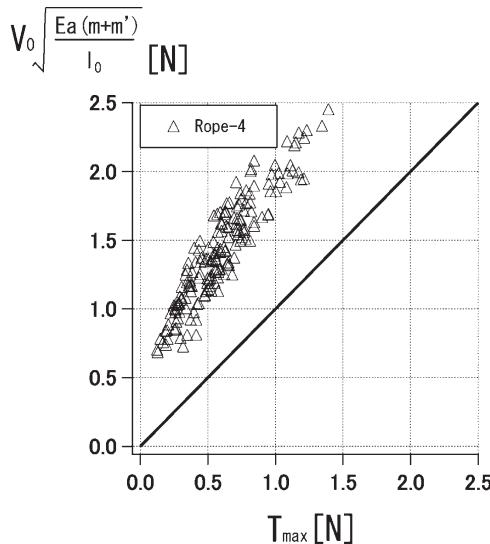


図 12 最大張力に関する実験値と推定値の比較, ( $C_M=0.5$ , 乾燥状態の絹糸)

られる港湾内の最大流速、そして船舶の係留状況を把握することにより破断強度に耐えうる係留索の径を決定することができる。

例として以下のような条件から係留索の径を決定してみる。船舶について質量  $m=10\text{ton}$ , 長さ  $L=13\text{m}$ , 幅  $B=3.5\text{m}$ , 喫水  $D=2\text{m}$  とする。また、係留索の長さを  $l_0=3\text{m}$ , 津波の流速と同じ大きさで船体が流されていると仮定し、船体速度  $V_0=3\text{m/s}$  とする。さらに係留索の材質はクレモナとし、ヤング率を  $E=5 \times 10^8$  とした。

漁港施設の設計において、漁船の接岸時の付加質量  $m'$  は以下の式で表すことができる<sup>9)</sup>。

- ・横付け接岸の場合

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

- ・縦付け接岸の場合

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

図 2 のような横付け接岸の状態で、図の方向から津波が入射する場合を仮定すると、付加質量は式 [4] として考えればよい。以上の仮定から最大張力  $T_{max}$  が係留索の径の関数と

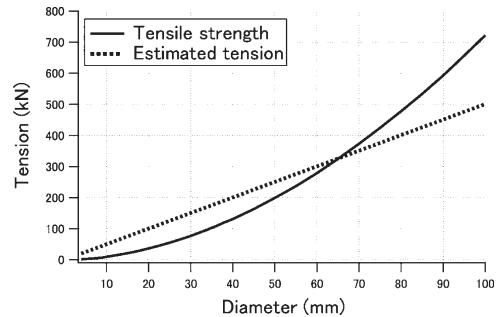


図 13 係留索の径に対する張力の推定値とクレモナの破断強度の関係

して求まるので、クレモナの破断強度との比較から、津波による引張りに耐えられるクレモナロープの径を決定することができる。

図 13 に結果を示す。この図から、径が 65mm 以下であれば破断の可能性があり、破断しないためには 70mm は必要であることがわかる。このように、船舶と津波の条件を与えることによって、簡単にロープ径を決定できることは漁港における防災対策にも非常に有用であるといえる。

ただし、本研究で提案した推定式は、津波の水位変動に対して水平速度が十分に大きい場合に適用可能である。これは、船舶の移動速度が水平方向のみによるためであり、津波の水位変動が大きくなり、水平軸と係留索とがなす鉛直角が大きい場合での適用は難しい。このような条件下での提案式の適用限界の定量的評価は今後の課題である。

## 5. 結論

本研究では、2次元平面水槽と矩形断面開水路を利用した水理実験を実施し、津波時における護岸に係留された船舶の挙動と係留索に働く張力を調べ、また、船体および係留索のパラメータによって導かれる簡易的な張力の推定式を提案した。本研究で得られた結論を以下に列挙する。

- ・船舶が岸壁に横付けの状態で接岸され、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

- が働く瞬間には片側は緩んでいる傾向にあるため、この場合、1点係留の状態として考えてよい。
- ・船舶が津波による強い流れを受ける際に係留索に働く張力の推定式を提案した。係留索の種類、係留条件そして船体速度によって表すことができる。
  - ・提案した張力の推定式を、1次元定常流実験の結果との比較により妥当性を示した。船体の質量のみならず付加質量を考慮する必要がある。
  - ・本研究の提案する張力の推定式を実際のスケールの津波、船舶を仮定することによって、津波外力に耐えうる係留索の径が決定できることを示した。

## 参考文献

- 1) 水産庁：災害に強い漁業地域づくりガイドライン，2006.
- 2) 小林英一，越村俊一，久保雅義：津波による船舶の漂流に関する基礎研究，関西造船協会論文集，第 243 号，pp.49-56, 2005.
- 3) 水谷法美，宇佐美敦浩，小池竜：津波による小型船舶の漂流特性とその衝突力に関する実験的研究，海洋開発論文集，第 23 卷，pp.63-68, 2007.
- 4) 池野正明，松山昌史：津波作用下における浮体構造物の非線形挙動解析，海岸工学論文集第 43 卷，pp.951-955, 1996.
- 5) 増田光一，佐竹寛之，高村浩彰，宮崎剛：津波による沿岸域に係留された浮体式構造物の運動と係留索張力応答の簡易推定法に関する研究，海岸工学論文集第 43 卷，pp.956-960, 1996.
- 6) 津田宗男，青野利夫，栗原明夫，中屋行雄，大木泰憲，高山知司：津波による大型係留船舶の動搖特性と係留施設への影響，海岸工学論文集第 53 卷，pp.816-820, 2006.
- 7) 津田宗男，大木泰憲，高山知司，東野洋司，林秀和：津波による係留船舶の動搖特性および係留施設への衝突力に関する模型実験，海洋開発論文集，第 22 卷，pp.535-540, 2006.
- 8) 中山哲嚴，山本正昭，津波による漁船の係留ラインの張力について，水産工学研究所技報，水産土木 6 号，pp.171-182, 1985.
- 9) 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.