

弾性チェーンによる係船ブイ張力の低減効果に関する実験

Model Test on Reduction of Buoy Mooring Tension by Elastic Chain

平石哲也*・富田康大**・宮崎祥一***・南 将人****

Tetsuya Hiraishi, Yasuhiro Tomita, Shoichi Miyazaki, Masato Minami

Mooring buoies are widely employed to moor vessels in some isolated islands facing to the ocean. The impulsive tension induced by large waves may cause heavy damages to the mooring line and buoy. The application of a rubber-chain is proposed to reduce the impulsive tension. The effects of the rubber-chain are experimentally investigated. An approximate computation model for estimation of the impulsive tension on the mooring line is verified in the experimental results. The computational result for a buoy with a mooring line of 40m demonstrates that the employment of a rubber-chain only 10m long is effective to protect the occurrence of the impulsive tensions.

Keywords: Mooring-buoy, Impulsive tension, Rubber chain, Model experiment

1. はじめに

日本本土より離れた離島港湾においては、船舶荷役施設として係船ブイが使用される場合がある。たとえば、沖縄県の南大東島では、島内の岸壁は外海に直接面しているため常時高波にさらされている。そのため、貨客船などの船舶は直接岸壁に係留できない。そこで、岸壁前面の沖合いに2つの係船ブイを配し、最初に船舶の船首と船尾の2点を係船ブイに係留する。そのあと、陸上から数本の係留索を繋ぎ、海上のブイ側のホーサーを緩めながら、同時に陸上側のホーサーを短くして船舶の位置を岸壁に近づける。船舶の荷役は、旅客も含めて岸壁上に固定されたクレーンによって行われる。このように、係船ブイ施設は、離島における船舶の係留施設として重要な役割を果たしている。また、外海に面した地点にブイが設置される例は、伊豆諸島でも見られ、このときは、沖合いの潜堤の設置個所表示灯として使用されている。

一方、冬季および台風期に大波高の波が作用した場合には、ブイに係留するチェーンが切断されたり、シャックル等が破損してブイが流出する事故が生じている(平石ら, 1993)。これらの事故の原因は、高波によってブイの係留ラインに衝撃的な張力が作用するためと考えられる。したがって、ブイの流出を防ぎ、離島港湾の安全性を高めるためには、波による衝撃張力の抑止が重要な課題となる。著者らは、これまでブイに作用する衝撃張力の低減法として、(i) ブイ形状の改良、(ii) アンカー周辺地盤の改良、(iii) 係留チェーンに十分な弾性を加える、ことを提案し(平石ら, 1993)、模型実験によって、それらの適用性を検討してきた。その結果、係留チェーンにバネのような弾性体を付加することが最も有効であることを明らかにした。ただし、模型実験では市販のコイルバネを用いたモデルを用いており、現地に適用できる工法について調べていない。また、弾性体の種類や伸び率を変化させた実験を行っておらず、どの程度の長さの弾性体を用いたらよいか検討していない。そこで、本報告では、現地に適用できる工法を対象として大縮尺の模型実験を行い、衝撃張力の低減効果を検討した。さらに、弾性体の伸び率を変化させた実験を行い、伸び特性がどのような影響を与えるかを検討した。最後に、衝撃張力の低減機構についてモデル化を図り、その計算モデルの妥当性を明らかにした。

2. 弾性チェーンと実験方法

(1) ブイとチェーンの模型

本実験では、水深30mの地点にCALM(Catenary Anchor Leg Mooring)型ブイが1本のチェーンによって係留されている状態を想定した。チェーンの他端は数十トンのコンクリート製シンカーに係留されるが、実験では海底に固定されているものとした。チェーン長は、現地ではカテナリーによる懸垂力によって、わずかであるが衝撃張力が軽減できるように40m程度に設定されている。本実験では、衝撃張力がより出現しやすい状態を作り、低減効果が測定しやすいように、係留ライン長を35mとした。図-1は、実験で対象としたブイの模式図を示す。ブイは、高さ2.1m、直径3.6mの鋼製の円筒型とした。実験の縮尺は、水槽の大きさを考慮してなるべく大きくするものとして、1/25を採用した。係留ライン長は、チェーンの吃水線から海底の固定点までとする。チェーン環の呼径は現地で60mmとし、水中重量が対応するように、実験では市販の飾りチェ

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部 (239 横須賀市長瀬3-1-1)

** 運輸省第四港湾建設局

*** 正会員 沖縄開発庁沖縄総合事務局

**** 正会員 八戸工業高等専門学校建設環境工学科(前 エコー(株))

ーンから適当なものを選んだ。模型チェーンの両端、すなわちブイとチェーンの接続点(ブイ下点)および海底の固定点(アンカー点)とチェーンの接続点に小型張力計を挿入し、実験では作用張力を測定した。図-1に示すように、係留ラインの一部では、張力計や接続用の'より戻し'自体が長さを有しているので、チェーン長は22.9 mとなる。実験では、使用チェーンをすべて (i) 通常チェーンとした場合、(ii) 使用チェーン長の約 1/2 を弾性チェーンに置き換えた場合、(iii) 使用チェーンの全部を弾性チェーンとした場合、について検討した。(ii) のケースでは弾性チェーン長は 11.3 m となり、これを S 型とする。(iii) の場合を L 型とする。

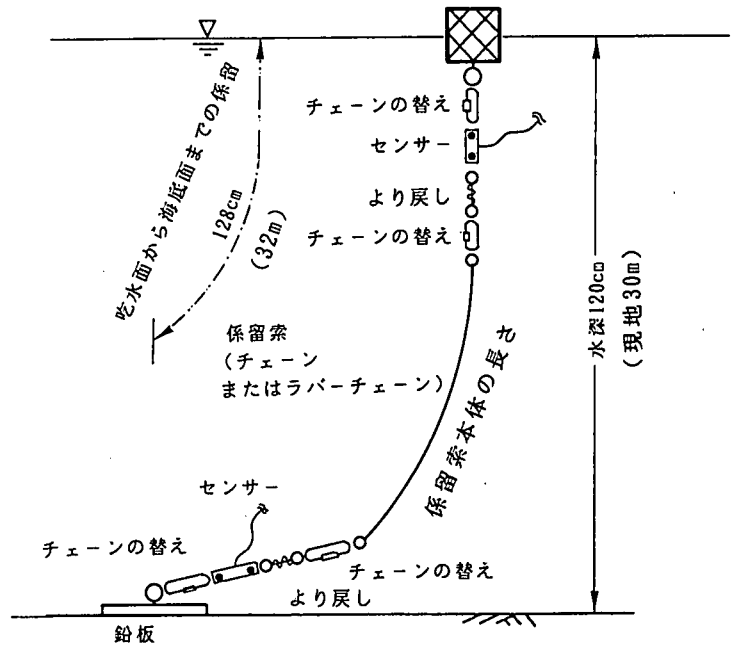


図-1 ブイ模型の模式

係留チェーンに弾性を付加する現実的な方法としては、弾性チェーンの使用が考えられる。これは、チェーン環をラバー（ゴム）でコーティングしたもので、本来は、チェーン環の腐食防止用に開発されたものである。隣り合うチェーン環は直接触れることがなく、間にラバーが挿入されているために、引っ張りに対してはゴムの圧縮によって抵抗し、ある程度まではラバー製の索と同様の伸び特性を示す。ラバーが大きく圧縮され、それ以上圧縮されないときから、チェーン環同士が触れるようになり、チェーンとしての強度を発揮する。

弾性チェーンの伸び特性は引っ張り試験で求められる。図-2は、本実験で対象とした弾性チェーンの引っ張り試験結果を示す。使用するゴムの材質と初期のチェーン環の間の隙間によって伸び特性は異なる。本実験では呼径 60 mm 程度のチェーンをゴムでコーティングして製作される弾性チェーンを使用するものとし、工場試験で得られた伸び特性と同一の伸び率を持つ模型を製作した。模型は、縮尺を考慮して、実機よりも弾性が高いゴムを用いてロープ状のものを製作し、ワイヤー線を平行に張り、それ以上ゴムロープが伸びないように工夫した。チェーン弾性については、多く製作されている柔性の豊かなもの（II型）と硬質のゴムを使って弾性を小さくしたもの（I型）の2種類とした。したがって、実験では以下の4種類の弾性チェーンを使用することになる；①チェーン長が長く、弾性が小さい（L1タイプ）、②チェーン長が係留ラインの1/2程度で短く、弾性が小さい（S1タイプ）、③チェーン長が長く、弾性が高い（L2タイプ）、④チェーン長が短く、弾性が高い（S2タイプ）。以下の記述では、L1、S1等の略号でチェーンの種類と長さを表す。図-2(a)および(b)がそれぞれLタイプおよびSタイプの試験結果を示す。実機と模型の伸び特性はよく一致し、精度の良い模型が製作できていることがわかる。弾性チェーンは張力が小さいときは、ゴムと同様の大きな弾性を示すが、張力が大きくなるとある長さより長く伸びない構造になっているので、伸び率が急速に小さくなり、図に示すように、伸び特性曲線が急激に大きな傾きを示すようになる。

(2) 実験波の条件と解析方法

実験は、最大水深 2.6 m、幅 20 m、長さ 50 m の単方向不規則波造波水路で行った。大波高時の波を対象とするため作用波の有義波高は目標値を 6 m 以上とし、あらかじめ模型を設置しない状態で波だけを測定

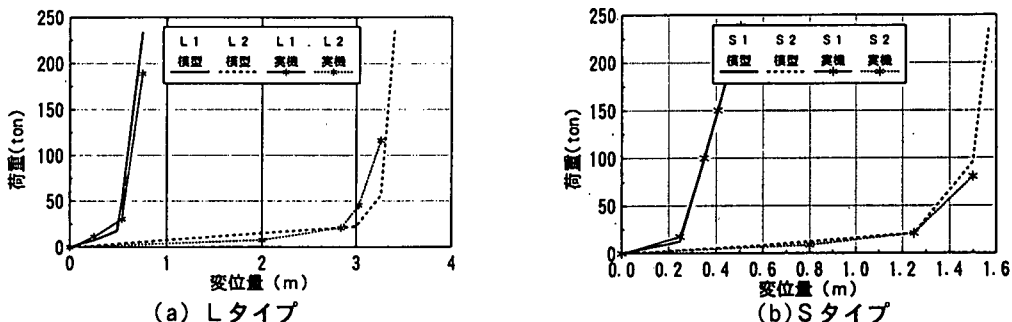


図-2 弾性チェーンの伸び量

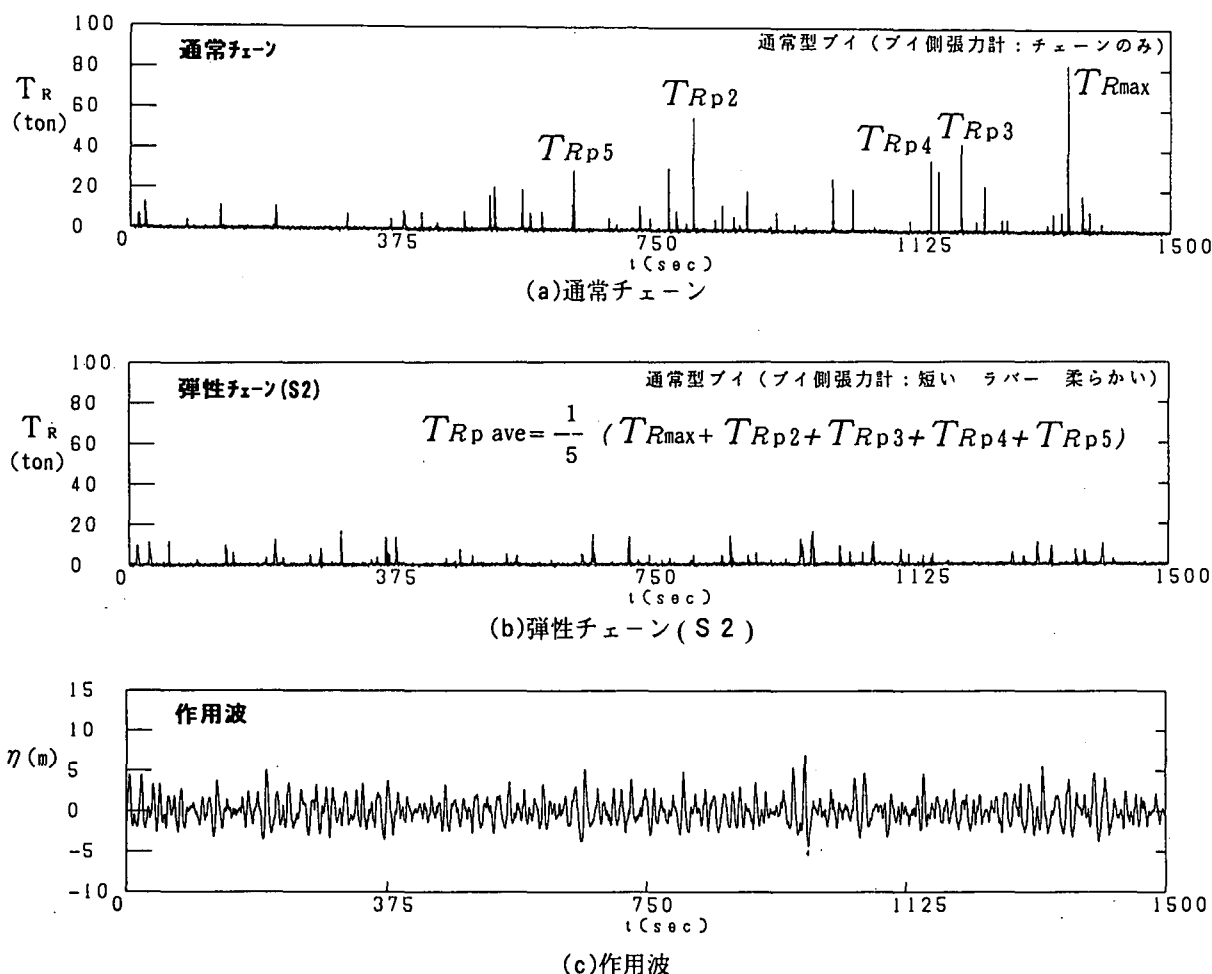


図-3 張力の測定波形

して、水槽で造波可能な範囲で実験波を設定した。実験に用いた波の有義波高 $H_{1/3}$ は 4 ~ 6.5 m で、有義波周期 $T_{1/3}$ は 1.0 ~ 1.4 s である。不規則波の周波数スペクトルは Bretschneider・光易型とした。あらかじめ、造波した波の周波数スペクトルを解析したところ、目標とした Bretschneider・光易型によく一致した。実験では、波連を変化させて 2 回波を作用させ、それらの各ケースの平均値を実験結果として採用した。

図-3 は、ブイの直下に取り付けられた張力計で測定した張力の時間変動と波高計で測定した作用波形を示す。図の最下段が作用波形である。図の上段および中段は、それぞれ通常チェーン、S2 タイプ弾性チェーン使用時の張力変動を示す。なお、作用波形は、通常チェーン使用時の場合に測定されたものである。弾性チェーンを用いない場合は、波高が大きくなると衝撃的に張力が作用し、離散的に大きな出力が現れる信号波形になる。弾性チェーンを使用した場合には、衝撃張力のピーク値が小さくなり、弾性チェーンの効果が生じていることがわかる。図に示すように衝撃張力は瞬時に生じるため、実験時間によるばらつきが大きいと考えられる。そこで、張力の大きさを定量的に把握するために、次の 2 つの量を整理した。(i) 最大張力 T_{Rmax} 、(ii) 平均ピーク張力 $T_{Rp\ ave}$ 。(i) は、図-3 に示すように測定時間の最大張力である。計測時間が現地換算で 2400 s であり、この間の波は 170 ~ 200 波であるから、これは、ほぼ $1/200$ 最大波高 $H_{1/200}$ によって出現する張力と考えることができる。(ii) は、測定時間中に出現した極大値を上から 5 個抽出し、それらを平均したものである。この平均ピーク張力はほぼ $1/40$ 最大波高 $H_{1/40}$ に対応した作用張力と考えることができる。波高がレーリー分布に従う場合には、次の関係が成立する (合田, 1990)。

$$H_{1/200} \approx H_{1/3}, \quad H_{1/40} \approx H_{1/3} \quad (1)$$

3. 実験の結果と衝撃張力のモデル化

(1) 実験の結果

図-4 は、ブイ下張力とアンカー側張力の比較をしたものである。図-4 (a) および (b) は、それぞれ最大張力および平均ピーク張力の値を示す。図の左上がりの対角線上に実験値がプロットされる場合は、ブイ下とアンカー側に作用する張力が等しいことになる。図では、チェーンの種類毎に記号を変えて値を示しており、各記号

に対応する直線は、最小二乗法で求めた回帰直線である。最大張力の場合の図 (a) を見ると、通常チェーンの実験値が大きくばらついているのがわかる。回帰直線の傾きは小さく、水平に近くなっており、ブイ下チェーン張力がアンカー側チェーン張力より大きくなっているケースが多い。弾性チェーンの場合には、回帰直線の傾きは、1 か、それよりも急になっており、アンカー側チェーン張力がブイ下チェーン張力より大きい。図 (b) の平均ピーク張力においても、通常チェーンの回帰曲線の傾きは水平に近い。ただし、通常および弾性チェーンにおいて、常にアンカー側張力の方が大きい。本実験においては、弾性チェーン長が短い場合には、ブイ下側へ取り付けられているため、ブイ下側で弾性チェーンの効果がより顕著になるものと思われる。また、係留ライン全体が弾性チェーンの場合でも、アンカー点が完全に固定されているために、アンカー側の衝撃張力がより大きくなっていると思われる。係留ラインでも上下で衝撃張力の大きさが異なるのは、衝撃張力が短時間に作用するため、局所的なラインの材質とその周辺の取り付け状況の影響が大きくなるためと思われる。以下では、弾性チェーンの効果が顕著に現れるブイ下チェーン張力を対象として特性を検討する。

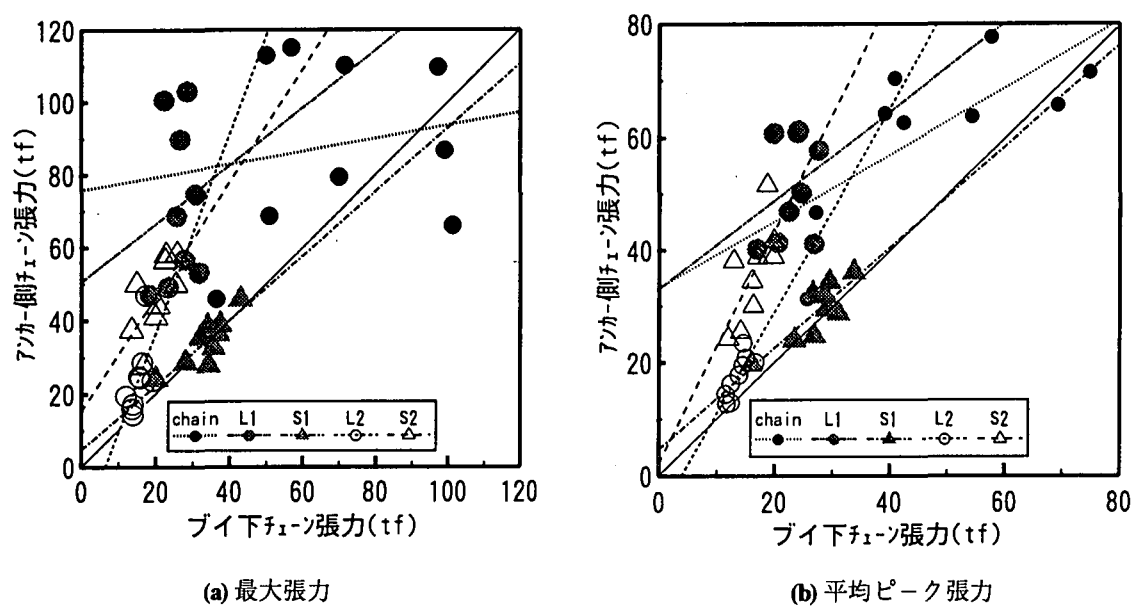


図 - 4 チェーンのブイ側とアンカー側張力の比較

図 - 5 は、係留ラインの種類による最大張力の変化を、通常チェーン時の張力に対する比として示したものである。図に示すように弾性チェーンを用いると最大張力を 2 ～ 3 割まで低減することが可能である。低減効果は、弾性チェーン長さよりもチェーンの伸び特性に大きく影響され、タイプ II を用いる方が効果大きい。タイプ II を用いると、係留ラインの一部を置き換えたケース (S1) でも、6.25 m の大波高時に、係留張力を 25 % 程度に小さくできる。

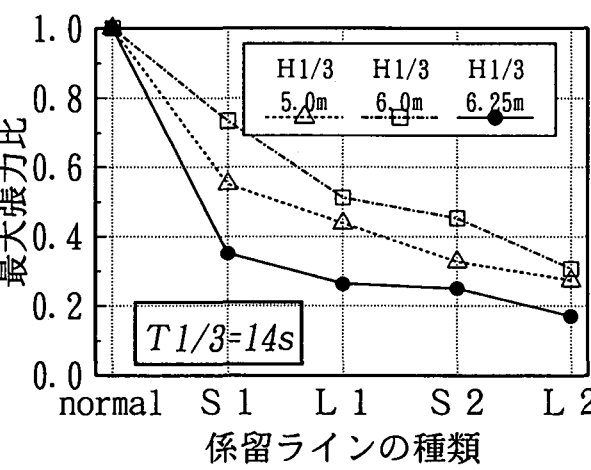


図 - 5 係留ラインの種類による張力の変化

(2) 衝撃張力のモデル化

ここでは、弾性チェーンの効果を定量的に調べるために、モデル化を行う。本モデルでは単純化のために、ブイ周辺の一定の体積の水がブイとともに水平に運ばれ、その運動エネルギーがすべて係留ラインの弾性エネルギーへ引き渡されるものとする。ブイの運動速度は水粒子の水平速度と同一でありとすると、その最大値は次式で表される。

$$u_{\max} = \alpha \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh kh}{\sinh kh} \quad (2)$$

ここで、 α は、水粒子速度が波の非線形性によって大きくなることを考慮した係数である。 k は波数、 h は水深である。ブイと水体の運動エネルギーは次式で示される。

$$E = \frac{1}{2} \kappa m_B u_{\max}^2 = \frac{1}{2} K \Delta l_{\max}^2 \quad (3)$$

ここで、 m_B は、ブイ本体の水中重量である。 κ は、ブイ

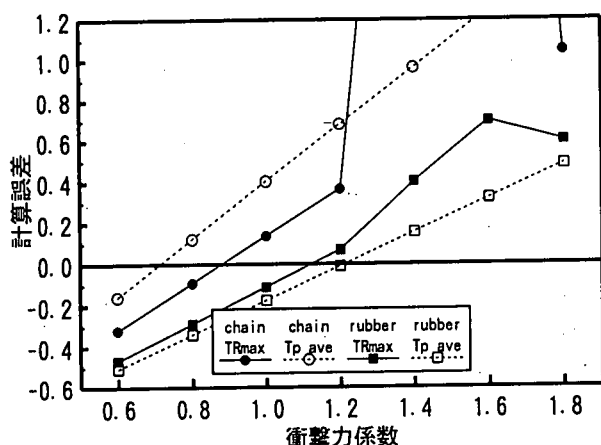
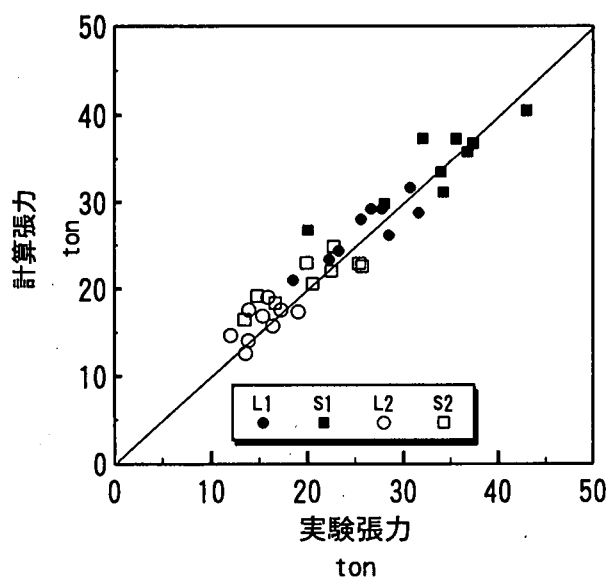


図-6 衝撃力係数に対する張力推定値の変化

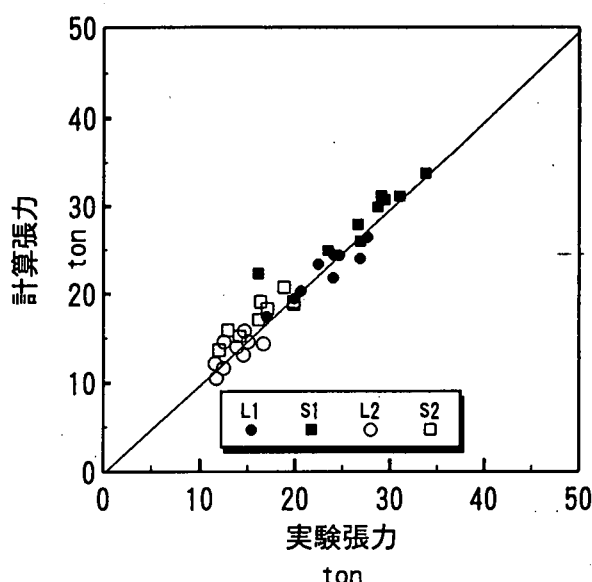
るので、これを改めて衝撃力係数 M とする。最初に、衝撃力係数 M を変えて、波条件から作用張力を推定し、実験値と比較を行った。このとき、 TR_{max} の推定には $H_{1/200}$ を、 $TR_{p, ave}$ の推定には、 $H_{1/40}$ を用いた。

図-6は、通常チェーンと弾性の大きいタイプIIに対して、推定値と実験値を比較したものである。縦軸に実験値に対する推定値の誤差の割合を示した。図から通常チェーンに対しては、係数が0.8程度であれば、推定値が実験値に一致することがわかる。弾性チェーンに対しては、係数の値は1.2程度が妥当である。図では示していないが、タイプIの弾性が小さい弾性チェーンに対しては、衝撃力係数が1.0程度にすればよいことがわかった。そこで、衝撃力の推定に当たっては、通常チェーンに対して $M=0.8$ 、タイプIの弾性チェーンに対して $M=1.0$ 、タイプIIのチェーンに対しては $M=1.2$ を用いるものとする。

図-7は、全実験ケースに対して、弾性チェーンに作用する張力の実験値と推定値を比較したものである。図-7(a)および(b)が、それぞれ最大張力および平均ピーク張力に相当する。図(a)および(b)においてすべてのデータが中央の右上がりの直線上にプロットされており、推定値が実験値に全ケースでよく一致することがわかる。したがって、本近似計算モデルを用いて、弾性チェーンを用いた係船ブイに作用する張力を推定することが可能であることがわかる。



(a)最大張力



(b)平均ピーク張力

図-7 チェーン張力の推定値と実験値の比較

イの回りの水体を考慮するための質量係数である。 K は、通常チェーンと弾性チェーンの合成の弾性率(ton/m)である。 Δl_{max} は、係留ラインの最大伸び量であり、式(3)の左辺が求まると、最大の伸び量 Δl_{max} が計算できる。合成弾性率 K は、通常チェーンおよび弾性チェーンのそれぞれの弾性率 k_1 および k_2 より次式で計算できる。

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} \quad (4)$$

弾性チェーンの伸び特性は、図-2より読みとれる。通常チェーンの伸び弾性率は、高山、平石ら(1984)に従って、次式で計算した伸び量から求めた。

$$\Delta l = (2 + 21.33\beta) \frac{Pl_c}{\pi d^2 E} \quad (5)$$

ここで、 l_c は通常チェーン長、 d はチェーンの呼径、 E はヤング率($=21500\text{kg/mm}$)、 P は作用張力である。 β は、チェーンの形状に関する係数で、ここでは1.5である。式(2)を(3)に代入すると、係数の組 $\kappa\alpha^2$ が現れる。

最後に、本モデルを用いて、現地における弾性チェーンの所要長を検討した。計算条件は水深30 m、係留ライン長40 mとし、呼径60 mmの通常チェーンとタイプIIの弾性チェーンを用いるものとした。図-8は、横軸に弾性チェーンによる置換長を示し、縦軸に作用張力の最大値と平均ピーク値を示した。作用波の条件は2種類で、WAVE1が $H_{1/3}=6$ m、 $T_{1/3}=10$ s、WAVE2が $H_{1/3}=8$ m、 $T_{1/3}=12$ sである。図に示すように、弾性チェーンを用いない場合には、80～115 tonの大きい衝撃張力が作用し、係船ブイの安全性に問題が生じる。弾性チェーンで係留ラインの一部を置換すると、衝撃張力は急速に小さくなり、10 mを置換ただけで、最大張力を1/4程度まで低下できる。弾性チェーン長が長くなるとさらに張力は小さくなる。特に最大張力と平均ピーク張力の差が小さくなることから、ブイ係留ラインには定常的に同程度の張力が繰り返し作用するだけで、突発的に大きい張力が作用する回数が小さくなることからわかる。

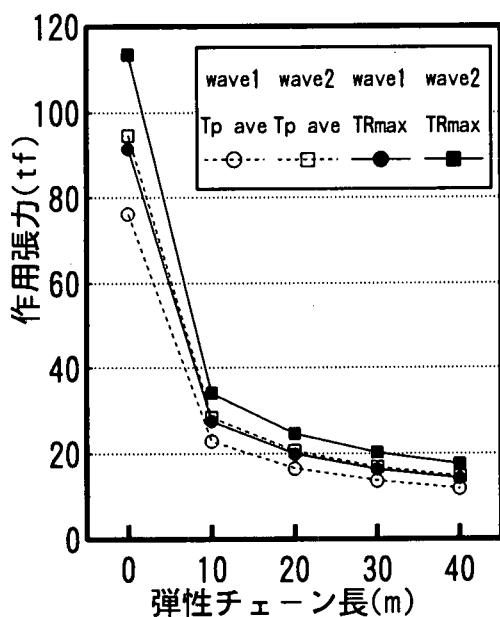


図-8 弾性チェーンの置換長に対する張力の変化

4. まとめ

本報告では、係船ブイに作用する衝撃張力の低減を図るために、弾性チェーンを使用して、実験によって、その効果を確認した。また、簡単な衝撃張力モデルを提案し、その妥当性を明らかにした。モデルを使用した計算から、係留ラインの1/4程度を弾性チェーンに置き換えただけでも、大きな効果が生じることがわかった。

参考文献

高山知司・平石哲也・永井紀彦・古川正美(1984): 一点係留ブイにチェーンで係留した船舶の振れ回り運動の特性, 港湾技研資料, No.508, 28p.

平石哲也・富田康大・松森孝弘(1993): 衝撃張力低減型ブイの開発に関する模型実験, 海洋開発論文集, Vol.9, pp.271-276.

合田良実(1990): 港湾構造物の耐波設計(増補改訂版), 鹿島出版会, pp.183-187.