

## (33) 係船ブイに作用する衝撃張力の低減法について

## COUNTERMEASURE TO IMPULSIVE TENSION OF BOUY-MOORING CHAIN

平石 哲也\*

Tetsuya HIRAISHI

\*工博 運輸省港湾技術研究所 水工部 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

キーワード: 係船ブイ, 衝撃張力, 弾性チェーン

(Mooring chain, Impulsive tension, Elastic chain)

## 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。外海に面した係船岸壁では、大きな波にさらされ動揺が大きいため、貨客船などの船舶は接岸して係留できない。そこで、船舶は、先ず船首および船尾側の2カ所に設置された係船ブイに係留される。次に、陸地側の2カ所の係船杭に係船ロープが繋がれる。そして、徐々に、ブイ側の2点における係船ロープを緩め、反対に、陸地側のロープを引っ張ることによって、船舶は岸壁に近づくことになる。このとき、離岸距離を数mに保ち、船舶が岸壁に衝突して破損しないような操船が必要である。船舶からの荷役は、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、外海に面した離島港湾施設においては、係船ブイは初期の船舶位置設定施設として非常に重要である。しかし、冬季および台風期に大きな波が作用した場合には、ブイに係留するチェーンに衝撃的な張力が作用し、ブイに係留するチェーンのシャックル部や、シンカーとの接続部が破損し係留チェーンが切断される事故が生じることがある。係船ブイが流出すると、定期船の運航が中止され、島内における日常生活に支障をきたすばかりでなく、流出ブイが漁網等からみ水産活動にも支障をきたす危険性がある。

ブイの係留チェーンに作用する衝撃張力を低減するために、平石・高山(1991)は、係留チェーンの一部を弾性体で置き換えることを提案し、実験を行っている。しかし、具体的な対処策として、限られた海象条件に対する検討にとどまっておらず、中間シンカーを有する係船ブイのみを対象としたため、不規則波の場合には弾性体による低減効果が明瞭ではなかった。そこで、本調査では、実際の港湾工事で使用できる弾性体を対象として、大縮尺の不規則波模型実験を実施して、弾性体による低減効果を検討した。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検証した。

## 2. 弾性チェーンによる衝撃張力の低減効果

図-1は、通常の港内の船舶係留ブイとして幅広く使用されているCALM(Catenary Anchor Leg Mooring)型ブイを示す。

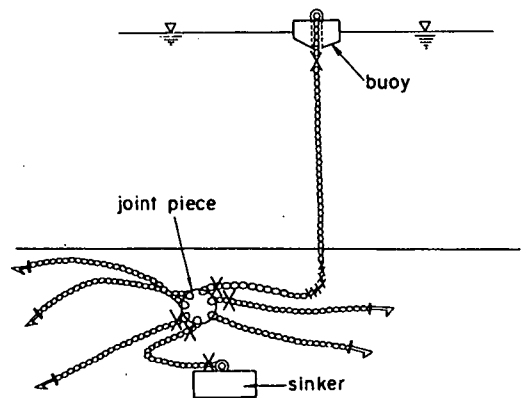


図-1 係船ブイの破損箇所

外海に面した離島港湾に通常の CALM 型係船ブイを設置した場合には、図-1の×印で示した個所が破損することが報告されている(平成3年度運輸省港湾局港湾技術シンポジウムにて沖縄総合事務局より資料発表)。本実験では、水深30mの地点に CALM 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-2は、実験で対象としたブイの模式図を示す。ブイは、高さ3.5m、直径3.5m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。チェーンに弾性を付加する最も現実的な方法は、「弾性チェーン」を使用することである。これは、チェーン環をゴムで覆ったもので、隣り合うチェーン環は直接振れることが無く、間にゴム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、ある程度まではゴムと同じ伸び特性を示す。ゴム部分が大きく圧縮され、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結果によって求められている。

図-2に示すように、より戻りや張力計の部分を除くと、チェーン長は22.9m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11.3mとなり、これをS型とする。(iii)の場合をL型とする。本実験では、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、実物に用いられるゴムよりも弾性が大きいもの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(2型)と硬質のゴムを使って弾性を小さくしたもの(1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、弾性が大きい(L2タイプ)、④チェーン長が短く、弾性が大きい(S2タイプ)。以降の記述では、L1、S1等の略号でチェーンの種類と長さを表す。

実験は、最大水深2.6m、幅20m、長さ50mの単一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6m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して、水槽で造波可能な範囲で実験波を設定した。実験の不規則波はBretschneider・光易型の周波数スペクトルを有するもの

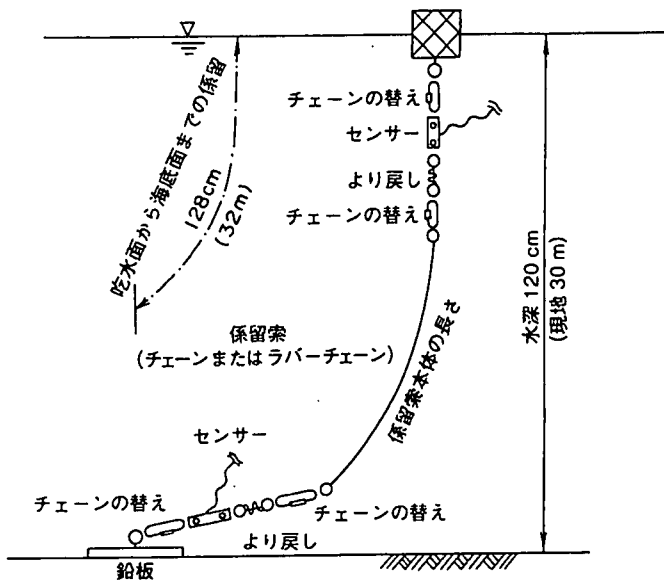


図-2 ブイとチェーンの実験模型

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るとすると、その最大値は次式で表される。

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

ここで、 $\alpha$ 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。 $k$ は波数である。ブイと水体の運動エネルギーは次式で示される。

$$W = \frac{1}{2} \kappa m_B u_{max}^2 = \frac{1}{2} K x_{max}^2 \quad (3)$$

ここで、 $m_B$ はブイ本体の水中重量である。 $\kappa$ は、ブ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。 $x_{max}$ 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  $x_{max}$  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。

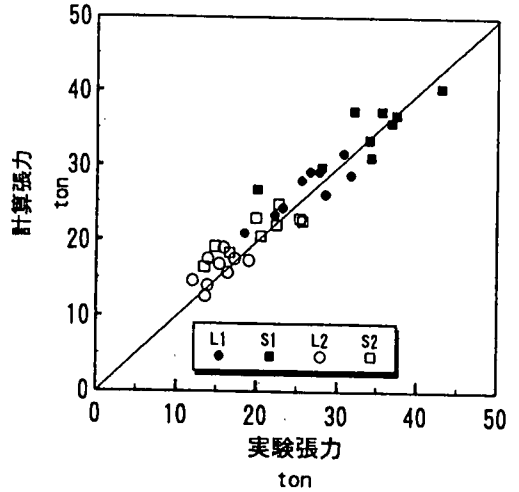
$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} \quad (4)$$

弾性チェーンの伸び特性は、工場での引っ張り試験結果から求めた。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。

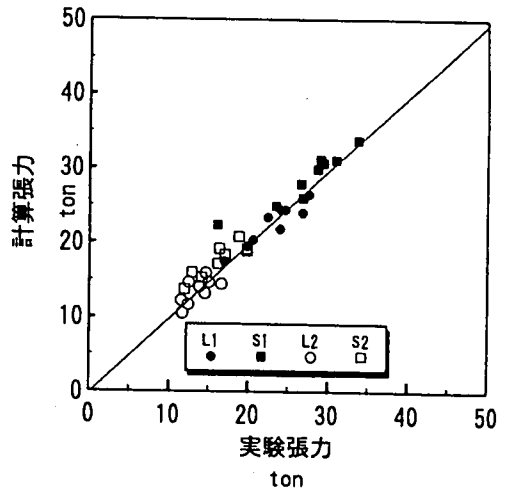
$$\Delta l = (2 + 21.33\beta) \frac{Pl_c}{\pi d^2 E} \quad (5)$$

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(=21500kg/mm)、 $P$ は作用張力である。 $\beta$ 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  $M$  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、 $T_{Rmax}$ の推定には  $H_{1/200}$  を、 $T_{Rpave}$ の推定には、 $H_{1/40}$  を用いた。実験値と計算値を比較した結果、衝



(1) 最大張力



(2) 平均ピーク張力

図-5 弾性チェーンに作用する張力の推定値と実験値の比較

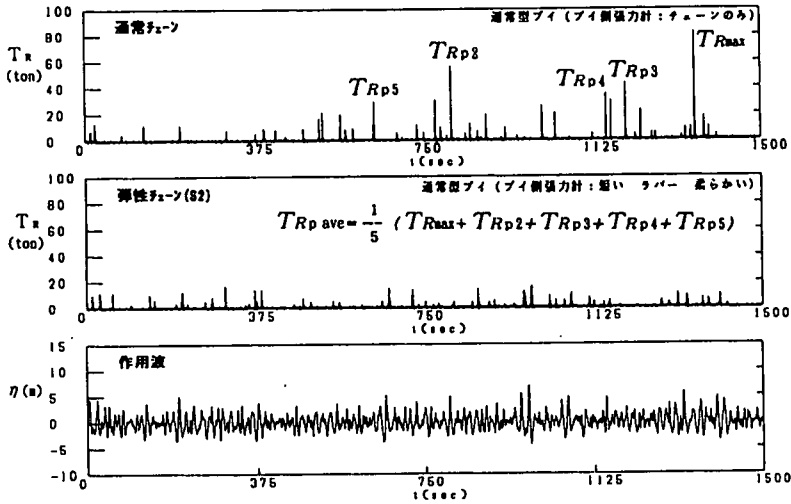


図-3 計測した作用波と張力波形

とし、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に測定された作用波と変動張力波形を示す。衝撃張力の発生は離散的で、連続的に現れるわけではない。実験データの解析にあたっては、まず計測期間中の最大値を最大張力  $T_{Rmax}$  として抽出した。また、計測結果の変動性を小さくするために、最大張力だけでなくピーク張力を大きいものから5つ取り出して、その平均値を平均ピーク張力  $T_{Rp\ ave}$  として整理した。計測時間が現地換算で2400sであり、この間の波は170~200波であるから、最大張力は、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。平均ピーク張力は、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ため、ほぼ  $1/40$  最大波  $H_{1/40}$  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、有義波高  $H_{1/3}$  に対して次の関係が成立する(合田, 1990)。

$$H_{1/200} \approx 1.8H_{1/3}, \quad H_{1/40} \approx 1.5H_{1/3} \quad (1)$$

図-4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、弾性チェーン長よりも、弾性チェーンの伸び特性に大きく影響され、タイプ1を用いる方が効果が大きい。タイプ1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、6.25mの大波高時に、係留張力を25%程度に小さくできる。

### 3. 衝撃張力低減効果の推定

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、

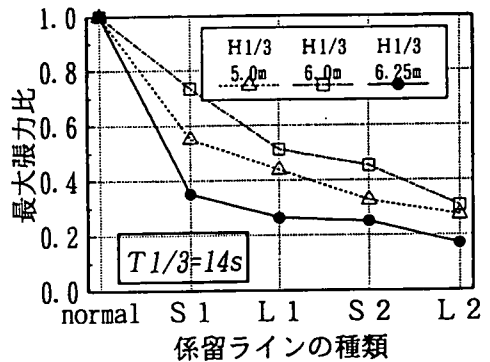


図-4 チェーンの種類に対する張力の変化

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1の弾性チェーンに対して  $M=1.0$ 、タイプ2のチェーンに対しては  $M=1.2$  を用いるものとした。

図-5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-5(1)が最大張力、(2)が平均ピーク張力についての両者の比較を示している。図-4(1)および(2)においてすべてのデータが中央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。

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30m、係留ライン長40mとし、呼径60mmの通常チェーンとタイプ2の弾性チェーンを用いるものとした。図-6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  $H_{1/3}=6m$ 、 $T_{1/3}=10s$ 、WAVE2が  $H_{1/3}=8m$ 、 $T_{1/3}=12s$  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、80~115ton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、10m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り、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がわかる。

#### 4. まとめ

本研究では、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、模型実験でその効果を確認した。また、模型実験結果を基にして、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。得られた結論は以下の通りである；

- 1) チェーンをゴムで被覆した弾性チェーンを用いると、最大張力を1/4程度まで軽減できる。
- 2) 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。

本研究において、京都大学防災研究所高山知司教授から終始懇切な指導を賜った。模型実験の実施にあたっては、シバタ工業(株)より弾性チェーンに関するデータを提供して頂いた。関係者の皆様に深く感謝する次第である。

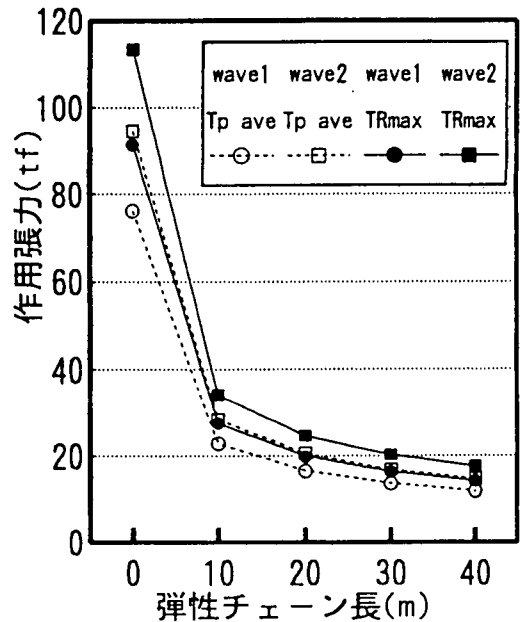


図-6 弾性チェーン長に対する係留張力の変化

#### 参考文献

- 平石哲也・高山知司(1991) : 多点係留ブイバースにおける係留張力と船舶の運動に関する模型実験, 港湾技研資料, No.735,1992,36p.
- 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.
- 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.

