

# 港 湾 技 研 資 料

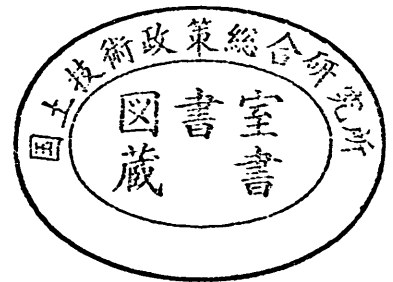
TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 816

Dec.1995

係船ブイに作用する衝撃張力の低減法に関する模型実験

平 石 哲 也  
富 田 康 広



運輸省港湾技術研究所

# 目 次

要 旨 .....	3
1. ま え が き .....	4
2. 係船ブイの形状改良と弾性体の使用による低減効果 .....	4
2.1 係船ブイの形状と弾性体のモデル化 .....	4
2.2 実験方法 .....	7
2.3 改良型ブイおよび弾性体による衝撃張力の低減効果 .....	8
3. 弾性チェーンによる衝撃張力の低減効果 .....	12
3.1 弾性チェーン模型と実験方法 .....	12
3.2 弾性チェーンによる衝撃張力の低減効果 .....	14
4. 衝撃張力低減効果の推定法 .....	15
4.1 計算方法とその適用性 .....	15
4.2 係留張力の推定例 .....	17
5. まとめ .....	17
参 考 文 献 .....	17
主 要 記 号 表 .....	18

# Model Test on Countermeasure to Impulsive Tension of Mooring Buoy

Tetsuya HIRAIISHI\*  
Yasuhiro TOMITA\*\*

In some isolated islands far from the Japanese main island, port facilities like a quay, sea wall and breakwater have not been completed. Mooring buoys are often employed to moor vessels at the quay walls exposed to the open sea. Joints of the buoy-mooring chain prove to break when large impulsive tensions occur during rough seas.

Several countermeasures against the impulsive mooring tension are proposed and tested experimentally in this study. The following concepts for the countermeasures are examined and evaluated, 1)to improve the shape of buoy-body, 2)to employ the elastic mooringline and 3)to develop the elastic anchoring. The elastic mooring line was proved to be most advantageous to avoid the impulsive tension.

Chain coated with rubber("rubber chain") is applicable as an elastic mooring line for buoys. In the later part of the paper, the magnitude of impulsive tension in the rubber chain is also examined in a large-scale model test. A numerical model has been developed to estimate the mooring tensions in the rubber chain. The experimental and numerical results demonstrate that the even partial substitution of the mooring chain by rubber chain is fairly effective to reduce the impulsive tension.

**Key Words :** Directional random wave, Impulsive mooring tension, Model test, Mooring buoy, Rubber chain

---

\* Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

\*\* Former Member of Wave Laboratory, Hydraulic Engineering Division (The Forth Port Construction Bureau, at present)

# 係船ブイに作用する衝撃張力の低減法に関する模型実験

平石 哲也\*

富田 康大\*\*

## 要 旨

離島港湾における係船施設あるいは沿岸構造物の位置表示器として、チェーン係留された円筒型ブイが用いられている。大波高時には、ブイの係留チェーンや接続部に衝撃的に張力が作用し、チェーンが切断される事故が生じている。本研究は、係留チェーンに作用する衝撃張力の低減法を検討し、その妥当性を模型実験で調べたものである。

最初に、平面水槽において、単一方向および多方向不規則波を作用させ、次の3種類の低減法を検討している；すなわち、i)ブイ本体形状の改良、ii)アンカー周辺地盤の改良、iii)係留チェーンに弾性を加える、である。実験の結果、係留チェーンに弾性を加える手法の効果が最も高いことが判ったので、具体的な低減法として弾性チェーンを用いて大縮尺模型実験を実施している。実験の結果、弾性チェーンの使用により衝撃張力を1/4程度まで低減できることが判った。さらに、弾性チェーンによる衝撃張力の低減効果を推定する計算法を提案し、実験結果によってその妥当性を検証している。

キーワード：衝撃張力、弾性チェーン、係船ブイ、多方向不規則波、係留チェーン張力

---

\* 水工部主任研究官

\*\* 第四港湾建設局(前 水工部波浪研究室員)

## 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は、大きな波にさらされているため、貨客船などの船舶は直接岸壁に係留できない。そこで、船舶は、最初に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だけでなく、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。

また、東京都の伊豆諸島では海岸部に設置された潜堤の位置を表示するため、マーカーブイが用いられている。これは、係船ブイと同様の鋼製の円筒型ブイで、チェーンで潜堤の端部にチェーンで係留される。高波浪時には衝撃張力の発生によりチェーンあるいはシャックル部が破損しブイが流出してしまう事故が生じている。

ブイの係留チェーンに作用する衝撃張力を低減するた

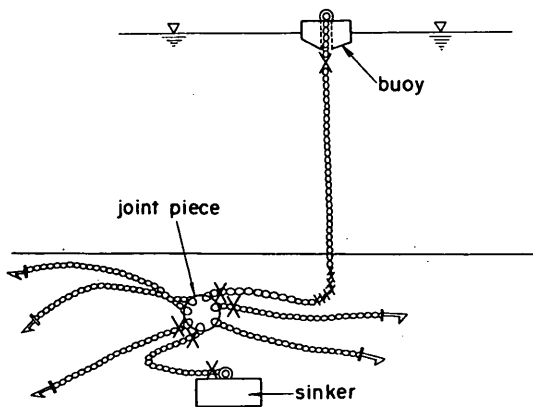


図-1 係船ブイの破損箇所

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、実験ケースが少なく、また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、まず一方向不規則波だけでなく多方向不規則波についても多くのケースの実験を行い、弾性体による低減効果を検討した。また、ブイの本体の形状を変化させた場合の低減効果について検討を行い、係船ブイ施設の改良法を提案した。そして、最も効果があると思われる手法について大縮尺の模型実験を実施し、具体的な低減法の効果を示した。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. 係船ブイの形状改良と弾性体の使用による低減効果

### 2.1 係船ブイの形状と弾性体のモデル化

#### (1) 係船ブイの改良形

図-1は、通常の港内で幅広く使用されるCALM型の係船ブイを示す。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×印で示した箇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報告されている)。これは、大波高波により衝撃的な張力が作用するために生じる被害と考えられており、ブイ形状あるいは係船チェーン構造を変化させることにより衝撃張力を低減させることができれば、破損被害を軽減することができる。

図-2は、本実験で対象とした係船ブイの形状を示す。タイプAは、通常の港湾に使用されている円筒型のブイで、現在離島港湾に使用されているペンシル型および円錐型もこのカテゴリーに含まれる。タイプAの円筒型ブイの直径および高さはそれぞれ3.5および2.0mで、吃水は1.3mである。タイプBは、ブイの外枠をスリット型にして、内部に浮力を持つ消波材を充填した消波型ブイである。実験では、消波材として、発泡スチロールの小片を用い、スリット型のアクリル製のブイ外枠に均等に詰めた。ブイの直径、高さおよび吃水はタイプAと同一である。タイプCは、ブイの外枠に、格子状の開口部を設けた透過型ブイである。ブイの内部は波ができるだけ通過できるように空隙を大きくしてあるが、ブイの浮力を保つために、浮力球が必要である。実験ではピンポン玉を内部に挿入することによってブイの浮力を保ち、チェーンを取り付けた場合にブイ上面が水面と一致するように吃水を調整した。ブイの直径および高さはタイプAおよ

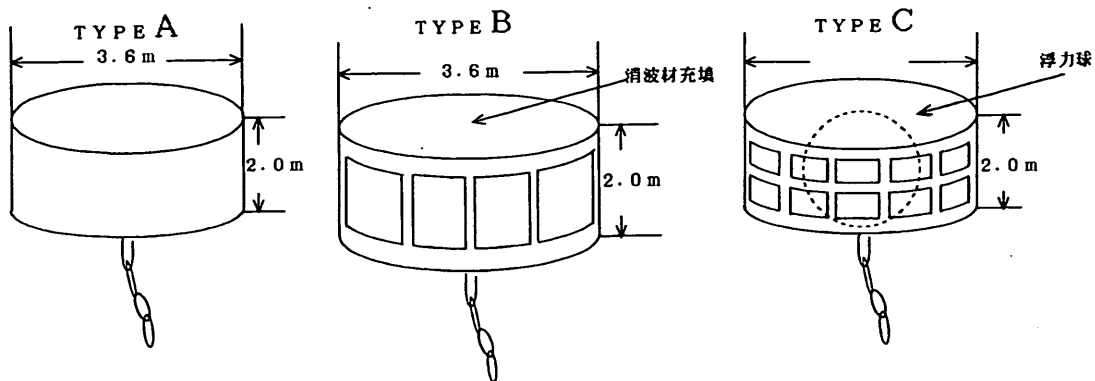


図-2 改良型ブイの形状

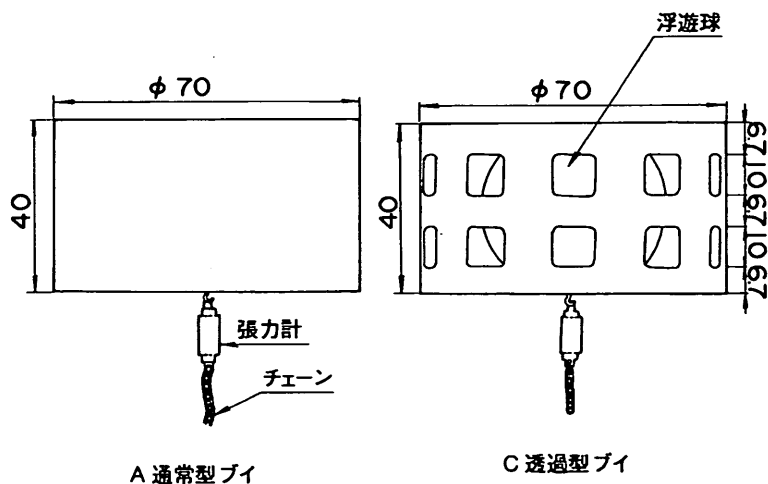


図-3 ブイ模型の詳細

びBと同じである。なお、図-1の係船ブイは、アンカーとブイの間に中間シンカーを有するが、本調査では、係留チェーンの弾性がおよぼす低減効果を明瞭に調べるために、シンカーから直接係留チェーンで繋ぐ方式とした。したがって、接続ピースから数本のアンカーチェーンが伸びているわけではなく、シンカーそのものをアンカーとしている。

ブイの設置水深は南大東島を対象として30mとし、係留チェーン長は40mとした。チェーンの空中重量は単位長あたり35kg/mである。チェーンおよびブイの模型

は縮尺1/50として、アクリルおよび飾りチェーンで製作した。図-3に、タイプAおよびCのブイの模型外観を示す。図中の数値はmmで表されている。写真-1にブイ模型の外観を示す。

#### (2) 弾性体のモデル化と弾性地盤模型

衝撃張力の低減方法としては、ブイ本体に働く張力が減るようにその形状を改良するとともに、チェーンの一部に弾性体を挿入することで、弾性変形により衝撃張力を吸収する手法が非常に有効であると考えられる。弾性を有するチェーンとしては、チェーンの摩耗を防ぐた

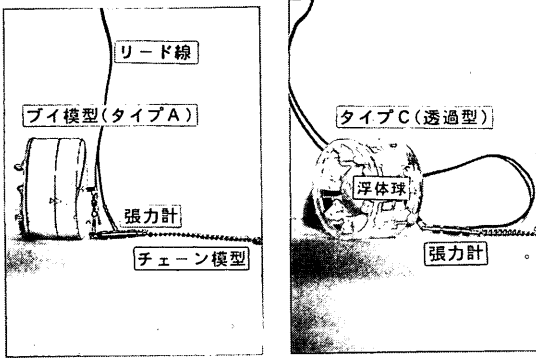


写真-1 ブイ模型の外観

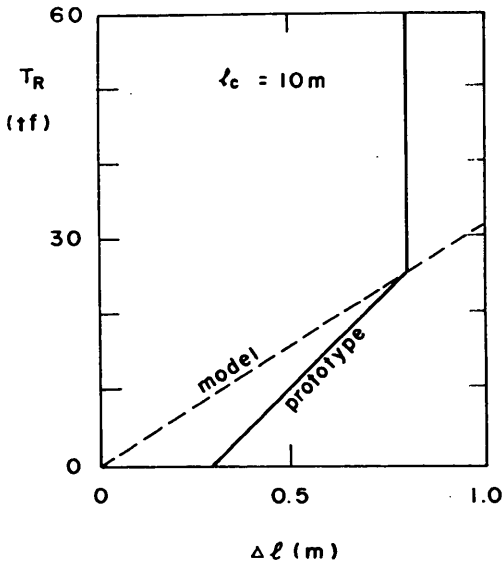


図-4 弾性チェーンの伸び特性

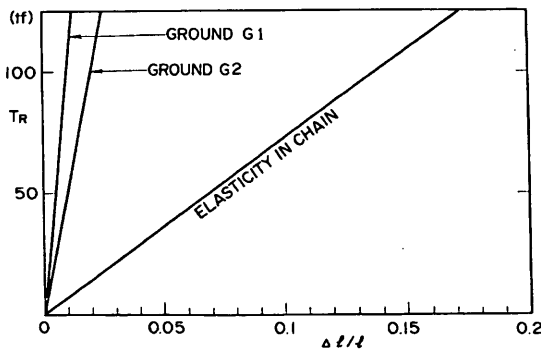


図-5 コイルバネおよび弾性地盤模型の鉛直変位量

めに実用化された弾性チェーンを用いることが考えられる。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、隣り合うチェーン環は直接接触することがなく、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係船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-4は弾性チェーンの伸び特性を模式的に示したもので、係留張力がある値より小さいときには、ゴムの圧縮による弾性によりチェーンには伸びが生じる。やがてゴムが十分に圧縮されるとチェーン環同士が接触するようになり、伸びは生じない。実験では、小縮尺の弾性チェーン模型を製作することが困難であるため、コイルバネを用いることによって伸びを再現することにし、係留チェーンの上部の5mを切断し、そのかわりにコイルバネを挿入した。図-5にコイルバネの伸び特性を示す。図の $l$ は係留系の全体の初期長さを示す。

ブイを海底に固定する方法としては、岩盤上に重さ数トン～数十トンの鉄製あるいはコンクリート製のシンカーを沈下させたもののほかに、岩盤を掘り下げ、シンカーを沈設したのちに砂で一部を埋設し、土の受動土圧で水平抵抗を増加させる場合がある。また、軟弱地盤上ではシンカーの自重によってシンカーを土中に沈下させる場合がある。したがって、チェーン固定点周辺の地盤が砂あるいは粘土となる場合があり、張力が作用することによって固定点が引っ張られ、微少な移動をすることが期待できる。このときには、ある程度地盤を弾性体として考えることができる。そこで、本実験では、コンクリート製の水槽床に直接アンカーを設置し、地盤を完全な剛性として考えた場合（地盤条件 $G_0$ ）と、水槽床に設置した30cm四方のゴム板にアンカーを取り付けて、地盤の弾性を考慮した場合を比較した。ゴム板の厚さが10mmおよび5mmの場合をそれぞれ地盤条件 $G_1$ および $G_2$ と呼ぶことにする。

前出の図-5に $G_1$ および $G_2$ の地盤模型のチェーン取り付け点における鉛直引っ張りに対する鉛直移動量を示す。地盤の伸び率はバネに比べると非常に小さいが、バネと同様な線形の伸び特性を示す。したがって、係留系としては、剛性地盤のアンカー部に硬いコイルバネを取り付けた場合と同様の働きを示すものと考えられる。

写真-2は、模型実験に用いた弾性を有する地盤模型を示し、厚さ数mmのゴム板の回りを板で固定したものを

製作し、ゴム板の中央にチェーンを取り付けた。

## 2.2 実験方法

図-6は実験模型の配置を示す。実験は、一面に幅28mの多方向不規則波造波装置を設置した平面水槽で行い、水槽中央部の有効造波領域内にブイ模型を設置した。水槽他の3面は消波材を充填したステンレス製の箱を並べた消波工を配置しており、入射波を乱す反射波の発生を防いでいる。実験では、造波装置前面の波高計アレイで波の検定を行って、造波信号として与える波高値を設定した後に、同時に二つのブイを設置して張力および作用波高を測定した。チェーン張力を測定するためには、張力計を用い、ブイの下とアンカー部に取り付けて2カ所の張力を測定した。実験におけるデータのサンプリング間隔は、0.025 sで、240秒(現地換算値で28.28分)間のデータを測定して解析した。

作用波は単一方向および多方向不規則波とし、沖縄県南大東島における波高の50年期待値を参考にして、有義波周期14~16 s、目標有義波高が9~10mになるように

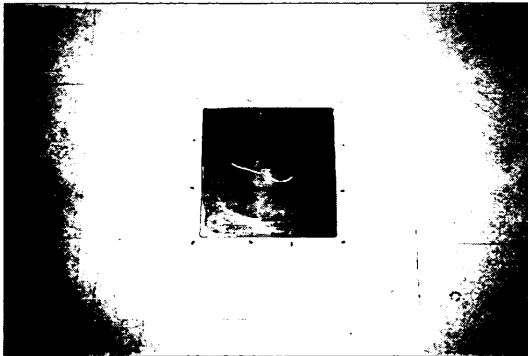


写真-2 地盤模型の外観

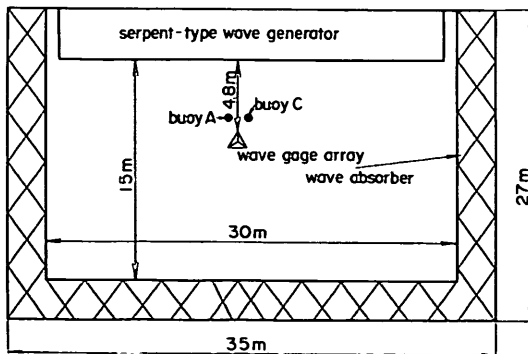


図-6 実験水槽と模型の配置

設定した。しかし、造波装置の性能限界のため、大波高のケースでは長時間の連続造波ができなかったため、ケースによっては目標の80%波高で実験を行っている。多方向不規則波は、光易型の方角関数を持つ波を造波し、有義波高および周期をそれぞれ8 mおよび14 sとし、合田・鈴木(1975)が提案した方向集中度パラメータ $S_{dir}$ を10~75に変化させた。方向集中度パラメータは波の方向分布特性を表す指標で、小さくなるほど波のエネルギーが広い範囲に分散する。単一方向波では $S_{dir}$ の値は無限大になる。

図-7は、左側に測定した張力の系時変化、右側に作用波のスペクトル解析結果を示す。左図の上段から、タイプAのブイのブイ下およびアンカー側、タイプCのブイのブイ下およびアンカ側のチェーン張力の変動を示す。最下段は作用波形である。図からわかるように、大きな波が作用すると同時に衝撃的に張力が作用している。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。そのピークの大きさも波高に比例しておらず、非線形性の強い現象であるため、数値計算による予測は困難である。

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 $T_{Rpmax}$ として整理した。図-8は、最大張力と平均ピーク張力の計算法を模式的に示したものである。

また、張力は単位幅あたりの波のエネルギーと関係していると思われるので、波高の2乗で張力を無次元化した整理も行った。

写真-3は、実験の様子を示したもので、造波装置前面に、タイプAとタイプBまたはCの係船ブイ模型を設置し、作用張力を測定している。

## 2.3 改良型ブイおよび弾性体による衝撃張力の低減効果

### (1) 波群によるばらつきと波の方向集中度の効果

図-9は、多方向不規則波を用いたケースにおける最大張力および平均ピーク張力の関係を調べたものである。方向集中度 $S_{dir}$ を5, 10, 25, 75と変化させて、各ケースについて2種類の波群を作用させた。最大張力の測定における問題点の一つは、張力計測におけるサンプリング間隔が大きすぎると正確に極大点を測定できないことである。そこで、本実験では、同一の波を2回作用させて計測を行い、測定値のばらつきを調べた。図-9では、RUN-1, 2として波群による差を、TRY-1, 2として、



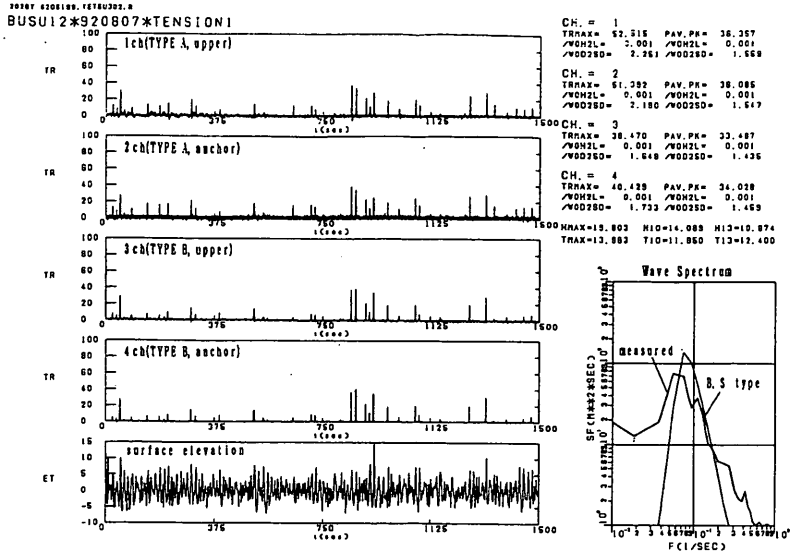


図-7 測定データの時系列波形

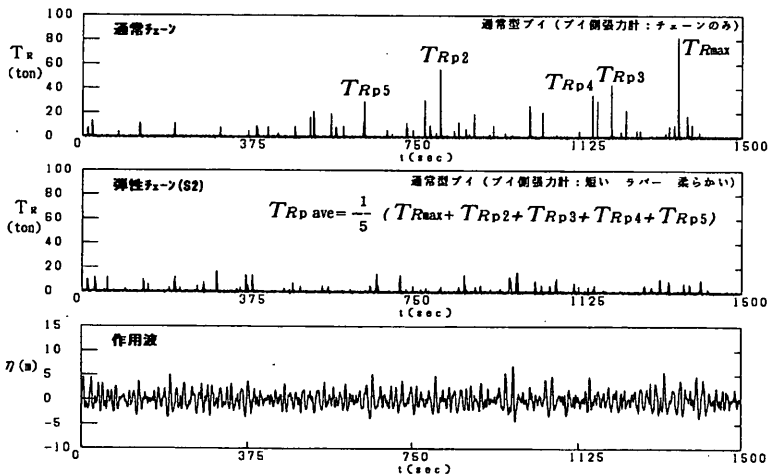


図-8 最大および平均ピーク張力の定義

試行回に対する差を調べた。丸および菱型の記号はそれぞれ最大および平均ピーク張力を示す。

図-9(1)のブイ下側の張力変化図に示すように、 $S_{max}=5$ のケースを除くと、第1回および第2回の試行において計測された値の差はそれ程大きくない。方向集中度が高くなると両者の差は特に小さくなり、 $S_{max}=75$ のとき、波群1および2ともに最大張力の差は6%以内である。波群1と波群2の測定値の差も小さく、それぞれの平均値の差は、測定値の10%以内になる。そこで、波群1および2を合わせて合計4回の計測値の平均値をケ-

スの代表値とした。各ケースの標準偏差を求めると、作用波の方向集中度が上昇するほど、標準偏差は小さくなり、実験の各試行間における測定データのばらつきが小さくなるのがわかる。したがって、方向集中度が高い多方向不規則波および単一方向不規則波の場合には、波群を変えた2試行の平均値を以て代表値とすることも可能である。

図-9(2)のアンカー側張力の場合も、波群1および波群2における4回の計測値の差は、 $S_{max}=5$ の場合を除いて小さく、四つの計測値の平均値を代表値とすること

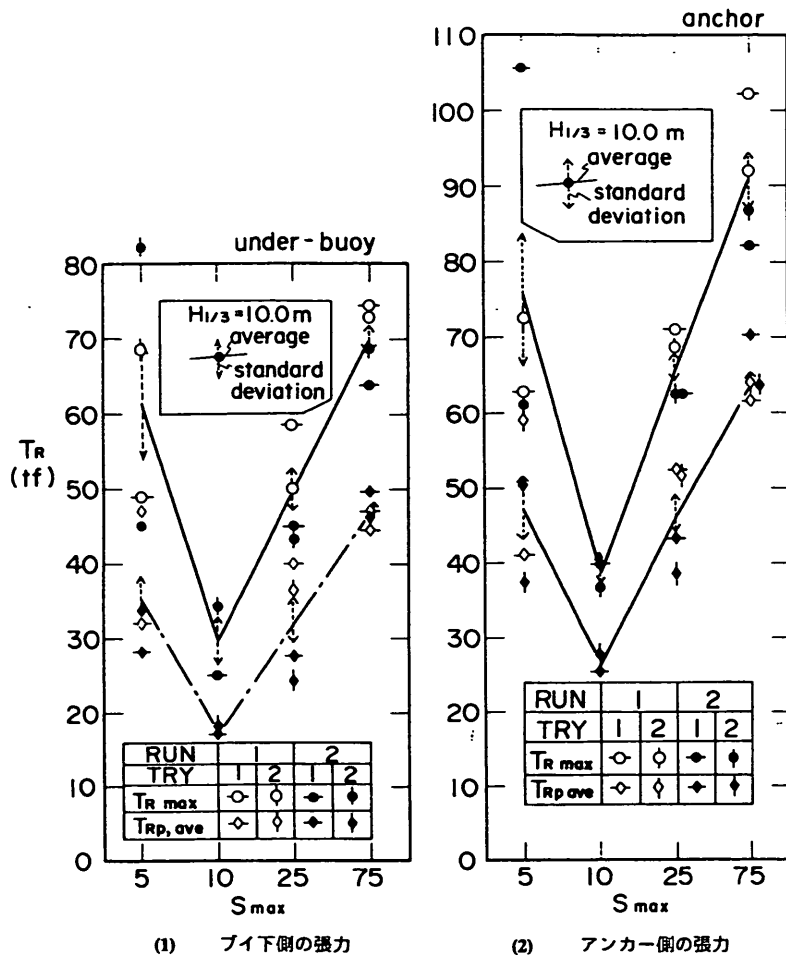


図-9 波の方向集中度に対する張力の変化



写真-3 改良型ブイに関する実験の様子

ができる。

方向集中度に対する最大張力の変化を調べると、ブイ

直下およびアンカー側の両計測点で、方向集中度が高くなり波の性質が単一方向不規則波に近くなるほど、張力は大きくなる。このことから、多方向不規則波と単一方向不規則波を比較すると係留張力は単一方向不規則波を作用させた場合に大きくなるのがわかる。これは、単一方向不規則波の場合には常に同一方向へ力が作用するために、係留チェーンが緊張した状態になっており、衝撃張力が発生しやすいためであると思われる。多方向不規則波の場合には作用する力の方向が分散し、チェーンが弛緩しやすいために張力が小さくなる。

次に、ブイ直下とアンカー側を比較すると、同一波高ではアンカー側の張力が大きくなっている。これは、アンカー側の張力計の片側が海底の固定点に繋がれているので、衝撃的に作用する張力を、何らかの弾性で吸収することができないためと思われる。ブイ直下では、ブイ

本体が運動し、チェーンそのものも若干の弾性を有しているため衝撃張力がアンカー側に比べてわずかに小さくなるものと思われる。ただし、実際の海域では、アンカー側には中間シンカーが設けられ、また、複数の地鎖が繋がれるので、衝撃的な張力の発生を若干吸収できる構造となっている。したがって、実際の海域において発生する張力の大きさとしては、ブイ直下の計測点における値を採用する方が望ましい。

図-9(1)および(2)の両者において、方向集中度が低く  $S_{max}=5$  場合には、実験データのばらつきが大きく、試行の度に最大張力および平均ピーク張力が大きく変化する。これは、波のエネルギーが幅広い方向からやってくるために、ブイの移動方向が広く分布し、チェーンが多くの方向へ引っ張られるためと思われる。 $S_{max}=5$  における張力の大きさは、 $S_{max}=10$  の場合より大きくなり  $S_{max}=25$  のケースと同程度になる。すなわち、 $S_{max}=10$  以上の場合には、波の方向集中度が高くなるほど張力は増加するが、 $S_{max}$  が10より低く、多方向性が非常に強い場合には、方向集中度が低くなる程、張力が増加する傾向にある。波の多方向性が強くなると、主波向の波力成分は減少するが、主波向に対して横方向の波力成分が増加することが指摘されている(平石・富田,1994)。 $S_{max}=5$  における波力の増大は、その増加した横方向の波力成分が影響しているためと思われる。ただし、 $S_{max}=75$  の場合に比較すると、 $S_{max}=5$  の場合の張力は小さく、設計に用いる最大張力としては、方向集中度の高い多方向不規則波あるいは単一方向不規則波の場合の張力を用いればよい。

従来の設計においては、波を単一方向波として考えていたので、図-9に示すように、波高が8m以上になるようなケースの場合には、非常に大きな張力を設定する必要がある。これは、安全側の設計ではあるけれども、波の方向集中度がやや低い場合には過大な値を与えることになる。したがって、波の特性が明確で、多方向性の強い波が作用すること明らかな場合には、多方向不規則波を用いて設計を行えば、設定する張力は小さくなる場合もあり、経済的な設計が可能となる。

## (2) 改良したブイ形式の効果

図-10は、ブイタイプの違いによる張力の変化を調べたものである。図の縦軸は、張力を波高の2乗で割って無次元化したものである。横軸のタイプA, B, Cはそれぞれ円筒型、消波材充填型、透過型のブイを示す。作用波の有義波周期は平均で12.8sである。

方向集中度によりデータに大きなばらつきはあるけれども、単一方向不規則波および  $S_{max}=75$  の方向集中度の

高いケースでは、ブイタイプAに比べて、ブイタイプBの無次元張力は小さくなり、ブイタイプCではさらに小さくなる傾向が見られる。方向集中度  $S_{max}$  が25の場合には、ブイタイプBの張力がAおよびCに比較して、大きくなる場合がある。ブイタイプAとCの張力はほぼ同じである。方向集中度がさらに低い  $S_{max}=10$  の場合には、ブイタイプBおよびCに比較して、タイプAの張力が小さくなる場合がある。

単一方向不規則波や方向集中度が高い  $S_{max}=75$  の場合には、タイプAに比較して、タイプBおよびCが有利である。したがって、ブイタイプの違いによる張力の変化は、作用波の方向集中度にも影響され、単一方向不規則波の場合だけでなく、多方向不規則波の場合についてもブイタイプによる張力の差を比べる必要がある。単一方向不規則波の場合には、タイプAに比べて、タイプBおよびCの張力低減効果が大いと言えるが、方向集中度が低い多方向不規則波の場合には、タイプBおよびCなどの改良型のブイで張力を低減させることができるとは言えない。

図-11は最大張力および平均ピーク張力について、単一方向および多方向不規則波の場合について、タイプAおよびタイプCのブイ係留系に作用する張力を比較したもので、縦軸に、タイプCに作用する張力をタイプAに作用する張力で除した比を示した。ブイ下の張力を'buoy'で、アンカー側の張力を'anchor'で示した。一方向波の場合には、ブイ下の張力については、タイプCを用いることによって張力を低減することができる。

方向集中度  $S_{max}$  が75および25の場合でも、タイプCを

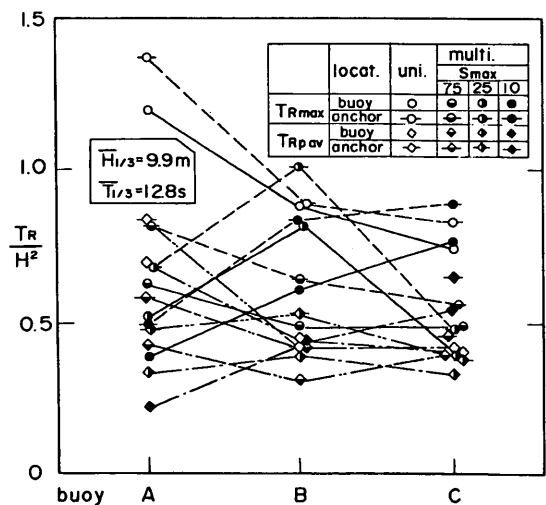


図-10 ブイ形式による張力の変化

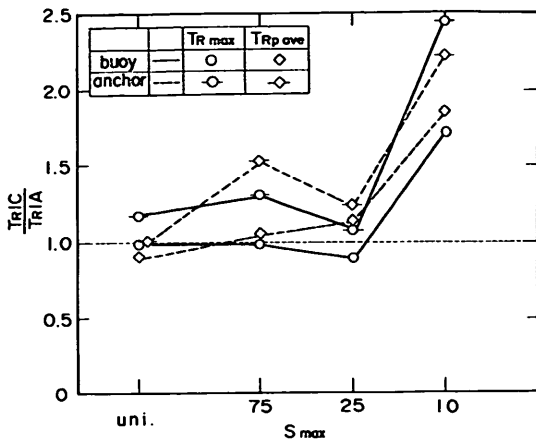


図-11 タイプAとCの作用張力の比較

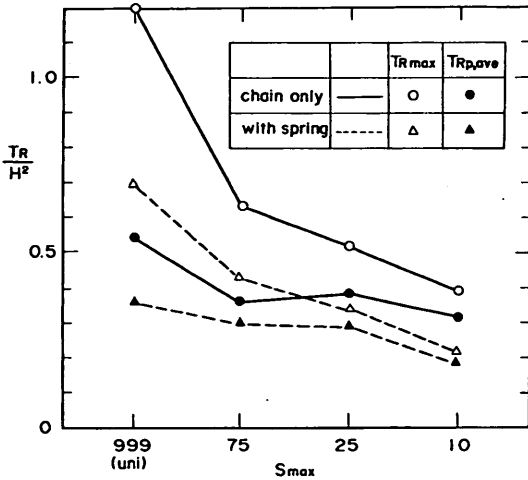


図-12 コイルバネによる張力の低減効果

用いるとブイ下の張力の最大値を少し低減できる。しかし、アンカー側の張力比は1以上であり、タイプCの改良型を用いても張力を低減することができない。方向集中度が低く $S_{max}$ が10の場合には、張力比が1.5以上になり、タイプCによる張力低減効果は期待できない。したがって、ブイ本体の改良だけでは、張力を低減することは困難で、チェーン自身の弾性化による衝撃張力の低減化を図る必要がある。

### (3) 弾性体の効果

図-12は、バネの一部を弾性体としたときの張力の最大値および平均ピーク張力を示す。図においては、波高の2乗で無次元化した張力を、通常のチェーンを用いた

場合に丸印、弾性チェーンを用いた場合に三角印で示した。チェーン自身に弾性体を入れた場合には、最大張力の低減に大きな効果があり、単一方向不規則波、 $S_{max} = 75, 25, 10$ の多方向不規則波の場合には、最大張力は6割程度に低減される。平均ピーク張力は、弾性体を用いることにより、用いない場合に比べて6~7割に低減される。したがって、チェーンの弾性は、衝撃的に作用する最大張力を低減することに最も効果がある。図では、5mの弾性チェーンを使用しており、波の方向集中度に係わらず、最大張力を6割に低減できる。

図-13は、最も最大張力が大きくなる単一方向不規則波のケースについて、周期の違いによる低減効果を調べたものである。周期が現地周期で12.9~14.5sの間においては、弾性体を用いることによって最大張力を5~7割に低減することができる。平均ピーク張力も弾性体を用いることによって低減することができ、張力の低減法としてはチェーンの一部に弾性体を用いることが有効であることがわかる。

### (4) 弾性地盤の効果

図-14は、地盤条件を変化させた場合について、最大張力および平均ピーク張力をブイタイプAについて調べたものである。剛性地盤の条件である $G_0$ においては、一方向波の場合に最大張力が大きくなる。一般に地盤条件が変化して、 $G_1$ および $G_2$ になると、チェーンの下部に弾性体を持ったときと同じ条件になり、最大張力は、地盤条件 $G_0$ に比べて小さくなる。ただし、 $S_{max}$ が10の場合には、剛性地盤においても張力はあまり大きくなりないので、地盤の弾性による張力の低減効果は見られない。したがって、波の方向集中度が高く、非常に大きな衝撃張力が作用する場合には、アンカーの周辺地盤の弾性を利用できるような構造を持つことにより最大張力の

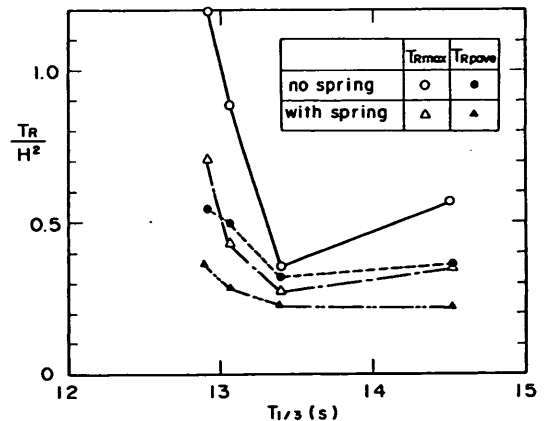


図-13 周期による作用張力の変化

低減を図ることができると言える。ただし、 $S_{max}=10$ の場合には弾性地盤による張力の低減効果は見られない。

図-15は、 $S_{max}=10$ と75の場合について、地盤条件が変化したときの、チェーンに弾性のある場合とない場合の最大張力を比較したものである。弾性体のない場合には、地盤条件が変わっても最大張力および平均ピーク張力ともに大きく変化しない。チェーンに弾性体を有する場合には、剛性地盤に比べると $G_1$ および $G_2$ の地盤を用いると最大張力をさらに低減でき、剛性地盤の場合に比べて6割程度に低減できる。このことから、衝撃張力の低減手法としては、チェーンの一部を弾性体とするとともに、アンカーを地盤に埋め込むことによって周辺地盤

の弾性を利用できれば、より大きな効果を得ることが明らかとなった。しかし、アンカー周辺地盤の弾性については詳細な点は明らかにされていない。また、地盤条件はブイ設置地点によって様々に変化し、必ずしもアンカーの形状改良によって地盤弾性を利用できるとは限らない。ちなみに、チェーンに弾性体を挿入し、かつアンカーによって地盤の弾性も利用するということが、結果としてチェーンの弾性バネを柔らかなものにしたことに他ならない。したがって、現在の工法で実現可能な衝撃張力低減法としては、弾性を有する係留系を使用することが考えられる。

### 3. 弾性チェーンによる衝撃張力の低減効果

前章の実験によって、衝撃張力の低減法としては、係留チェーンに弾性体を挿入する手法が最も効果的であることが判明した。そのため、大きな係留張力が生じる単一方向不規則波を対象として、より現実に近い弾性体を用いたチェーンについて大縮尺の模型実験を実施することにした。

#### 3.1 弾性チェーン模型と実験方法

##### (1) 弾性チェーンの模型

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-16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。

図-16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、チャー

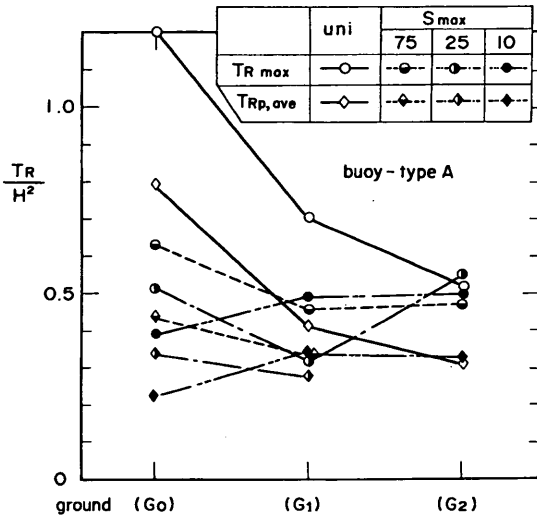


図-14 地盤条件に対する係留張力の変化

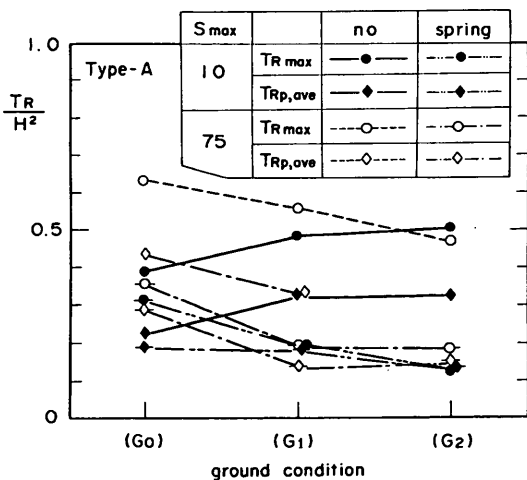


図-15 地盤弾性とコイルバネによる張力の低減効果

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)の場合を以後、L型とする。

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。

図-17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60mm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、実物に用いられるゴム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(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

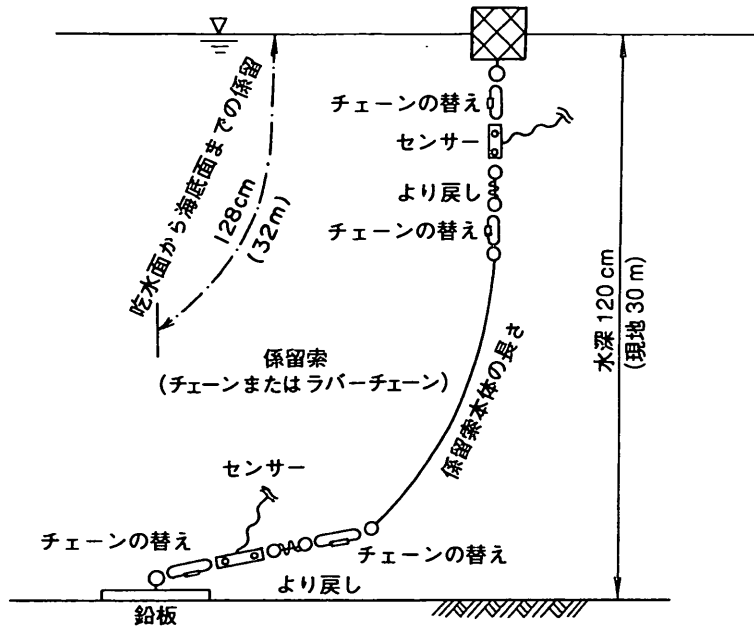
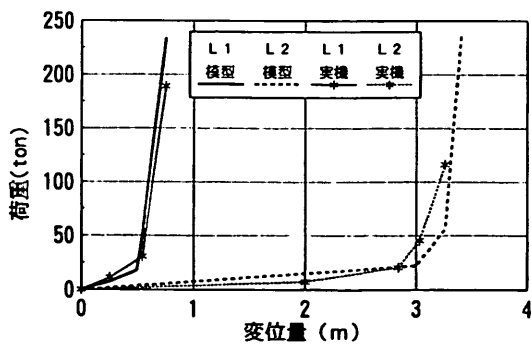
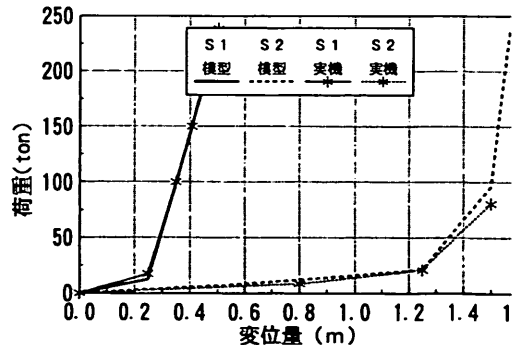


図-16 弾性チェーンと係船ブイの模型



(1) Lタイプ



(2) Sタイプ

図-17 弾性チェーンの実機と模型の伸び率の比較

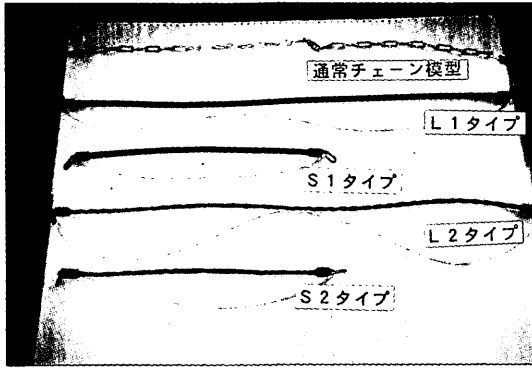


写真-4 弾性チェーンの実験模型

表-1 弾性チェーンに関する実験で用いる波

	実験 I	実験 II
模型縮尺	1/50	1/25
波の種類	多方向不規則波 単一方向不規則波	単一方向不規則波
周波数スペクトル	Bretschneider-光易型	Bretschneider-光易型
方向関数	光易型 ( $S_{max}=5, 10, 25, 75$ )	
水深	30 (cm)	120 (cm)
波高	18.20 (cm)	7.8, 9 (cm)
周期	2.0, 2.2 (s)	1.0, 1.2, 1.4 (s)

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。

図-17は、工場試験による実物の弾性チェーンの伸び特性と模型の伸び特性を比較した図である。図-17(1)および(2)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。写真-4は、製作した弾性チェーンの模型を示す。

## (2) 実験波の条件と解析方法

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。

表-1に実験に用いた波の有義波高および有義波周期を示す。なお、表-1において実験Iは前章に示した縮尺1/50の模型実験を示し、実験IIが縮尺1/25の弾性チェーンを用いた模型実験にあたる。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、波群を変化させて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。

張力の大きさを定量的に把握するために、前章の実験と同様に次の2つの量を整理した；(i)最大張力 $T_{Rmax}$ 、(ii)平均ピーク張力 $T_{R,ave}$ 。(i)は、前出の図-8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2400s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,1975)。

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

## 3.2 弾性チェーンによる衝撃張力の低減効果

図-18は、ブイ直下の最大張力とアンカー側の最大張力の比較をしたものである。図において横軸および縦軸は、それぞれブイ直下およびアンカー側の張力の値を示し、破線および鎖線は各チェーンタイプの実験結果から求めた最小二乗直線である。S1およびL2のチェーンタイプについては、両者の値は同一ではないが、差は小さく、ほぼ同程度の張力が作用していることがわかる。黒丸の通常チェーンの場合にはデータのばらつきが大きいのが、張力が大きくなるとアンカー側の張力が大きくなる傾向が読みとれる。

図-19は、ブイ直下の平均ピークチェーン張力とアンカー側平均ピークチェーン張力を比較したものである。平均ピーク張力についても、L2およびS1の場合には、ブイ下側とアンカー側の張力はほぼ等しくなっていることが読みとれる。しかし、L1、S2および通常チェーンの場合には、アンカー側の張力がブイ直下側よりも大きくなる傾向がある。

以上の傾向から、ブイ下チェーン張力はアンカー側チェー

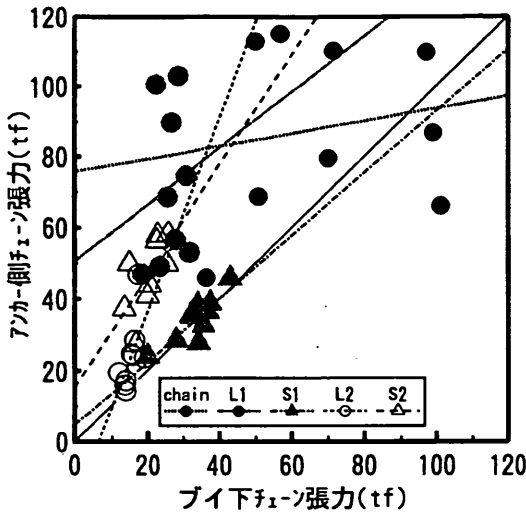


図-18 チェーンのブイ側とアンカー側の最大張力の比較

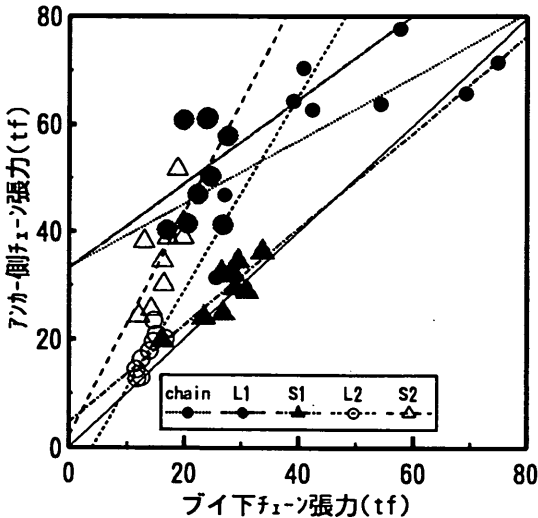


図-19 チェーンのブイ側とアンカー側の平均ピーク張力の比較

ン張力よりも小さくなる傾向があり、弾性チェーンによる効果が大いことがわかる。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、図-9でも考察したように、本実験では水槽底面に固定したアンカーに直接チェーン模型を繋いでおり、衝撃張力が発生しやすい構造となっている。実際の使用に当たっては、アンカー側には中間シンカーおよび複数の地鎮が使われるので、その構成は実験と異なる。したがって、アンカー側については実験で

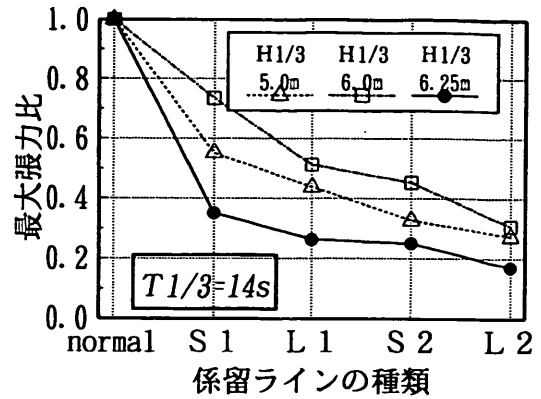


図-20 係船チェーンの種類に対する張力の変化

発生した張力の大きさをそのまま現地に適用できるとは限らない。そこで、以下の考察では、実機と同一の構成となっているブイ直下側に作用する張力について特性を検討する。

図-20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2を用いる方が効果大きい。タイプ2を用いると、係留ラインの一部を置き換えたケース(S2)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。

#### 4. 衝撃張力低減効果の推定法

##### 4.1 計算方法とその適用性

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るとすると、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、 $\alpha$ 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



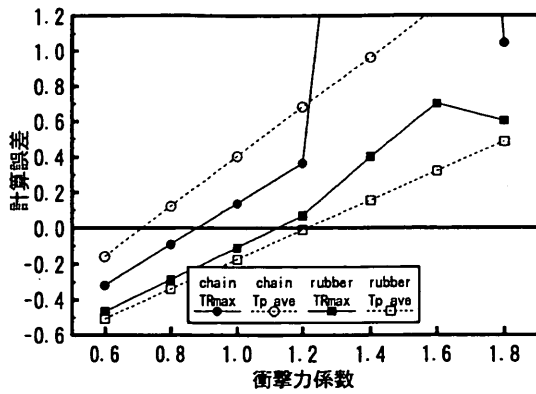
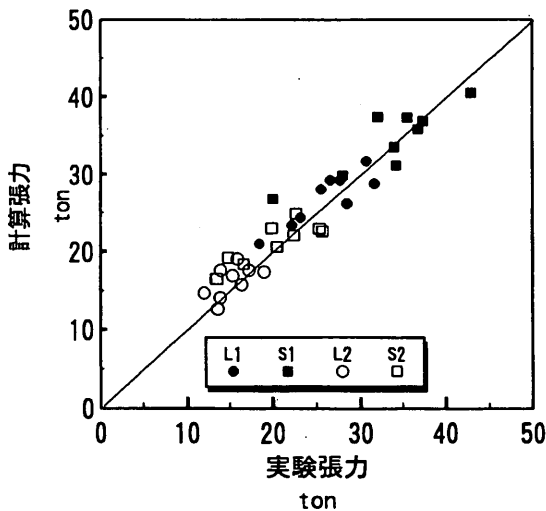


図-21 衝撃力係数 $M$ に対する係留チェーン張力の推定値の変化

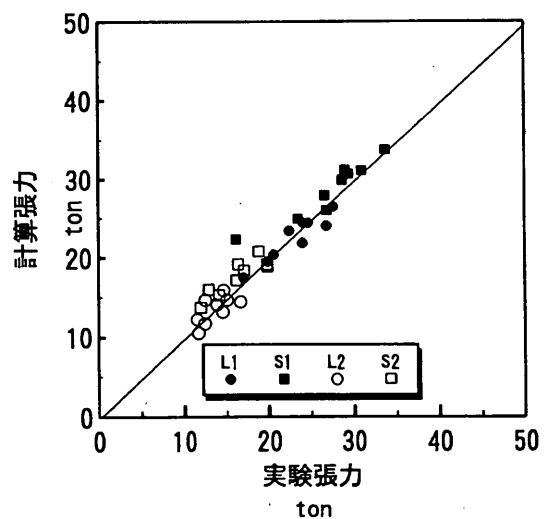
イの回りの水体を考慮するための質量係数である。 $K$ は、通常チェーンと弾性チェーンの合成の弾性率( $\text{ton}/\text{m}$ )である。 $x_{\text{max}}$ は、係留ラインの最大伸び量であり、式(3)の左辺が求まると、最大の伸び量 $x_{\text{max}}$ が計算できる。合成弾性率 $K$ は、通常チェーンおよび弾性チェーンのそれぞれの弾性率 $K_1$ および $K_2$ より次式で計算できる。

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}} \quad (4)$$

弾性チェーンの伸び特性は、図-17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。



(1) 最大張力



(2) 平均ピーク張力

図-22 弾性チェーンに作用する張力の推定値と実験値の比較

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

ここで、 $l$ は通常チェーン長、 $d$ はチェーンの呼径、 $E$ はヤング率( $=21500\text{kg}/\text{mm}$ )、 $P$ 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 $M$ 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、 $T_{R \text{ max}}$ の推定には $H_{1/200}$ を、 $T_{R \text{ p, ave}}$ の推定には、 $H_{1/40}$ を用いた。図-21は、通常チェーンと弾性の大きいタイプ2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、同様の計算を行って、タイプ1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 $M=1.2$ を用いるものとする。

図-22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-22(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-22(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。

#### 4.2 係留張力の推定例

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-23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 $H_{1/3}=6\text{m}$ 、 $T_{1/3}=10\text{s}$ 、WAVE2が $H_{1/3}=8\text{m}$ 、 $T_{1/3}=12\text{s}$ 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、80~115ton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を置換しただけで、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。

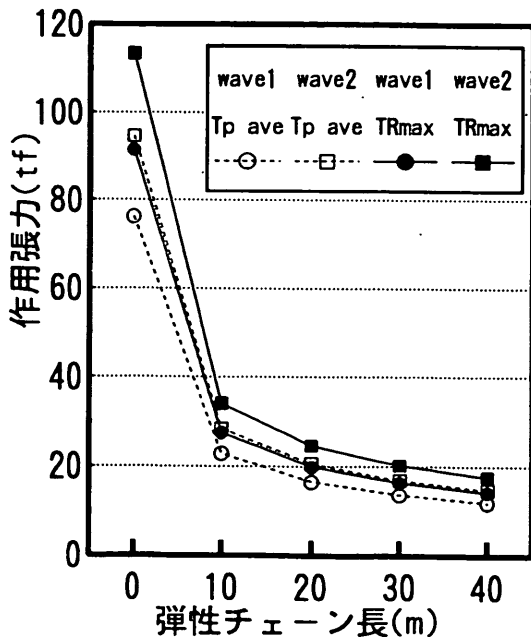


図-23 弾性チェーン長に対する係留張力推定値の変化

#### 5. まとめ

本研究では、まず、係船ブイに作用する衝撃的な係留張力を低減する手法として、①ブイ本体の形状を変化させる、②チェーンの一部に弾性体を用いる、③周辺地盤の条件を変化させる、ことを試み以下の結論を得た；

- 1) ブイ本体の形状を変化させる手法は、すべてのケースについて作用張力を低減できるわけではなく、衝撃張力の低減手法としては効果的でないことがわかった。
- 2) チェーンの一部に弾性体を用いると、すべてのケースについて係留張力を低減することができて、衝撃張力の低減法としては効果的であることがわかった。
- 3) 地盤条件が剛地盤から弾性を有する地盤に変化すると非常に大きな張力を低減させることに効果があることがわかった。
- 4) 多方向不規則波と単一方向不規則波を比較すると、ブイの係留張力は単一方向不規則波作用時により大きくなる。

次に、小縮尺模型を用いて、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。得られた結論は以下の通りである；

- 5) 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。
- 6) 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(前 水工部長)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。住友ゴム工業(株)からは、地盤模型に用いるゴム板の特性に関する御教示を頂いた。両社の関係者の皆様に深く感謝する次第である。

(1995年9月29日受付)

#### 参考文献

- 合田良美・鈴木康正(1975):光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No. 230, 45p.
- 合田良美(1990):港湾構造物の耐波設計(増補改訂版), 鹿島出版会, pp183-187.
- 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.

平石哲也・富田康大・鈴木康正 (1994):円柱波力における波の多方向性の影響, 海岸工学論文集第41巻, pp.836-840。

主要記号表

$d$	:チェーンの呼径
$E$	:ヤング率 (=21500kg/mm)
$h$	:水深
$H$	:波高
$H_{1/3}$	:有義波高
$H_{1/40}$	:1/40最大波高
$H_{1/200}$	:1/200最大波高
$k$	:波数
$K_1$	:通常チェーンの伸び率
$K_2$	:弾性チェーンの伸び率
$K$	:合成弾性率
$l_c$	:通常チェーン長
$m_B$	:ブイ本体の水中重量
$M$	:衝撃力係数
$P$	:チェーン環に作用する張力
$S_{max}$	:方向集中度パラメーター
$T$	:周期
$T_{1/3}$	:有義波周期
$T_{Rmax}$	:最大張力
$T_{R\text{ ave}}$	:平均ピーク張力
$U_{max}$	:ブイ運動速度の最大値
$W$	:ブイと水体の運動エネルギー
$x_{max}$	:係留ラインの最大伸び量
$\alpha$	:水粒子速度の非線形を考慮する係数
$\beta$	:チェーンの形状係数
$\kappa$	:ブイ周りの水体を考慮する質量係数

港湾技研資料 No.816

1995・12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1995) by P.H.R.I

Allright reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of. P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。