

ブイ係留チェーンに作用する 衝撃張力に関する模型実験

Model Experiments on Impulsive Tensions of Buoy-Mooring Chain

平石哲也^{*}・高山知司^{*}

Tetsuya Hiraishi and Tomotsuka Takayama

Large impulsive tensions are exerted on a mooring chain when large waves attacks to a Catenary Anchor Leg Mooring buoy installed at a berthing area facing to an ocean. The sinker of the buoy may be moved and some of joints may be broken off by the large impulsive tension even if the maximum tension is smaller than the breaking load of the chain. The maximum tension is related to the wave energy expressed as the product of the square of wave height and the wave length. The impulsive tension can be reduced by employing an elastic 'rubber chain' as a part of the buoy mooring chain.

Key Words : Hydraulic model test, Buoy, Impulsive tension, Mooring chain

1. はじめに

船舶係留用施設の一つとして係船ブイがある。係船ブイとしては、SALM(Single Anchor Leg Mooring)型とCALM(Catenary Anchor Leg Mooring)型が考えられる。SALM型のブイ係留チェーンには余剰浮力による張力が作用しており、この余剰浮力によって復元性をもたしている。また、CALM型は、1本あるいは複数本のチェーンで緩く係留され、シンカーおよびアンカーによって海底に固定される。この場合、ブイの変位に伴うチェーンの懸垂力の変化で外力を吸収することができる。しかし、大きな波高が作用するとチェーンが伸びきってしまい、衝撃的に過大な張力が作用し、チェーンあるいはシンカーおよびブイとの接合部が破断する事故が生じている。

重村ら(1987)は、カテナリー理論を用いた静的張力の算定式によってブイ係留チェーンに作用する張力を評価し、波浪中におけるブイの2次元運動および張力変動を計算している。しかし、波高が大きくなるとチェーンが伸びきってしまい、カテナリー理論で張力を求めることは困難である。佐尾ら(1984)は流体力と運動の高次項を取り入れた運動方程式を時間領域で解いて大波高時のブイの運動および係留張力の変動を求めている。しかし、対象としたブイはSALM型で、衝撃的な張力を取り扱ってはいない。したがって、現在のところ弛緩したチェーンが大波高波浪によって瞬時に伸びきってしまうために発生する衝撃張力については理論的な検討は行われていない。そこで、本実験では、弛緩係留されたブイを対象として、現地の条件と同じ係留方法を用いて、大波高波浪時に作用する衝撃張力の大きさおよび発生頻度について検討することを目的とした。さらに、そのような衝撃張力を低減する方法について検討した。

2. 係留ブイの概要と実験方法

図-1に、本実験で対象とした係船ブイの設備概要を示す。本ブイは外洋における大型タンカー係留用に設計されており、直径5.3m、高さ2.45m、重さ20tonの円筒型CALM型ブイである。ブイには呼径105mm、長さ35.4mの鉄鋼製電気溶接チェーンが取り付けられている。チェーンの破断試験荷重、許容荷重および単位長さ当たり重量はそれぞれ549.5tf、183.16tf および241.4kg/mである。チェーンの他端は4つ目ピースに取り付けられている。4つ目ピースには上記のブイ係留チェーンと同一規格のチェーンがさらに3本取り付けられている。その中の1本は長さ3mで他端に水中重量20tonの鉄製シンカーが取り付け

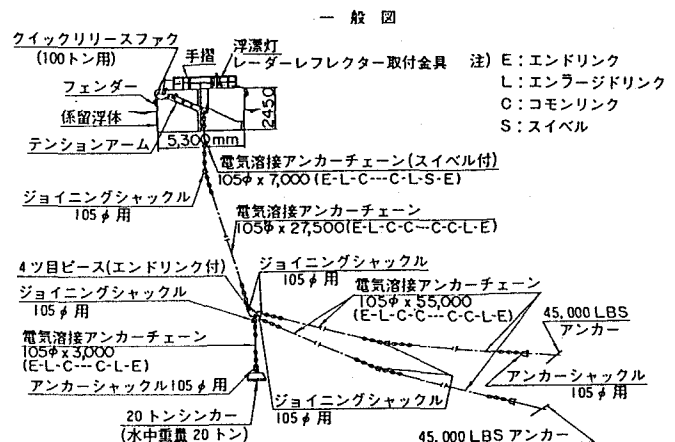


図-1 係船ブイの設備概要

*正会員 運輸省港湾技術研究所水工部 (239 神奈川県横浜須賀市長瀬 3-1-1)

けられている。残りの2本は長さ55.0mで重量10数トンのアンカーにつながっている。ここでは、ブイと4つ目ピース間のチェーンを**ブイ係留チェーン**、アンカーと4つ目ピース間のチェーンを**アンカーチェーン**と呼ぶ。ブイ係留チェーンに作用する張力は主にシンカー重量によって吸収し、アンカーチェーンは海底面との摩擦によってシンカーの水平方向の移動を防ぐ役割をする。実験では、水槽の規格および実験精度を考慮して、模型縮尺を1/50にし次元則はフルード則にしたがうものとして模型を製作した。

図-2は、ブイおよび係留装置の模型概要を示す。ブイ模型は合成樹脂材で製作し、寸法、重量および吃水を実機と相似させた。チェーン模型としては、単位長さ当たり重量が実機と相似するようなアクセサリチェーンを使用した。アンカーチェーンについては、2本を1本のチェーンでモデル化することにし、実機チェーンの2倍の単位長さ中り重量を持つチェーンに相当する模型チェーンを1本使用した。アンカー点は水路床上に固定した。シンカーは重量が実機と相似する釣り用の重りを用いた。そして、ブイ係留チェーンのブイ側、アンカーチェーンの4つ目ピース側に最大10kgまで測定できる小型張力計を取り付け、チェーンにかかる張力を測定した。

図-3は、実験水槽と水槽内における模型の配置状況を示す。実験は、幅1.4m、長さ40mの長水路で行なった。水路の一端には、無反射機能（平口、1988）を備えたピストン型造波装置が設置されており、規則波および不規則波を造波できる。水路の他端には消波ビーチが設置されている。ブイ模型はシンカー位置が水路のほぼ中央に位置するように設置し、その位置から造波機および消波ビーチ側へ約2m離れた点に波高計を設置して作用波高を測定し、2本の波高計の測定結果を平均したものをブイ設置点における波の諸元とした。シンカーからアンカーの間には長さ55mのアンカーチェーンが取り付けられているので、図に示すように、アンカー点が波向に対してシンカー位置より前側にあるか、後ろ側にあるかによって係留条件が異なる。アンカー位置の波向に対する相対位置の影響を検討するために、本実験では2通りの設置方法を検討した。ここでは、図において(A)のようにアンカーがシンカーより造波板よりにある場合を「前側係留」、(B)のようにアンカーがシンカーより造波板から遠い場合を「後側係留」とした。また、シンカーが衝撃張力によって浮き上がったりすることがあるかどうかを検討するために、ガラス製の水槽側壁を通して、実験中のブイおよびシンカーの移動状況をビデオで撮影した。

ブイの設置水深は、係留バースの水深と平均潮位を考慮して24.05mで一定とした。本係船ブイは外洋に面した係留施設であるので、荒天時には大きな波が作用する。本実験では、規則波とBretschneider-光易型のエネルギースペクトルを持つ不規則波を作用させた。規則波の周期 T は12, 14, 16, 18sとし、12, 14, 16sの規則波は波高 H を9, 10, 11mとした。 $T = 18s$ のときは $H = 10, 12, 14m$ の3段階に変化させた。不規則波の周期は有義値で14, 16, 18sとし、有義波高 $H_{1/3}$ を7, 8, 9mの3段階に変化させた。実験は造波開始後60sしてから、不規則波および規則波の場合、模型での値でそれぞれ410s（現地48min）および25s（現地3min）間計測を行い、50ms間隔でデータをデジタル化して、波高計および張力計で測定したデータの解析を行った。不規則波については、波速を変えて各ケースについて2回計測を行った。

3. 衝撃張力特性

図-4に、測定された張力の時間変動の様子を示す。図-4は、前側係留の場合に有義波高および周期がそれぞれ9mおよび18sの不規則波が作用した場合のブイ係留チェーン張力の時間変動を示す。図の中では3つの鋭いピークを持つ山がみられるが、山と山の間の張力の値は小さく、ほとんどチェーンには張力が作用していないことがわかる。したがって、チェーンが弛緩している時のカタナリー張力は非常に小さく、波が作用してブイの位置が変化しても、チェーンが伸びきらない限りは大きな張力が作用しない。波高がある程度以上に大きくなりチェーンが緊張状態に

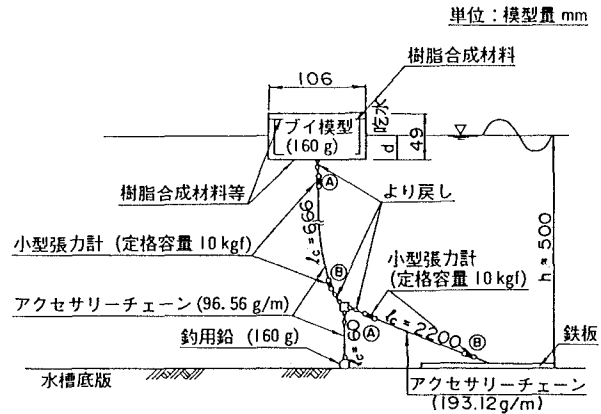


図-2 ブイおよび係留装置の模型

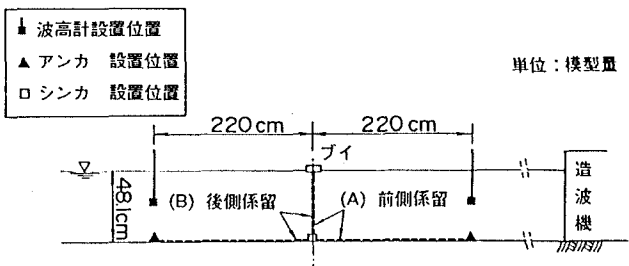


図-3 実験水槽における模型の配置

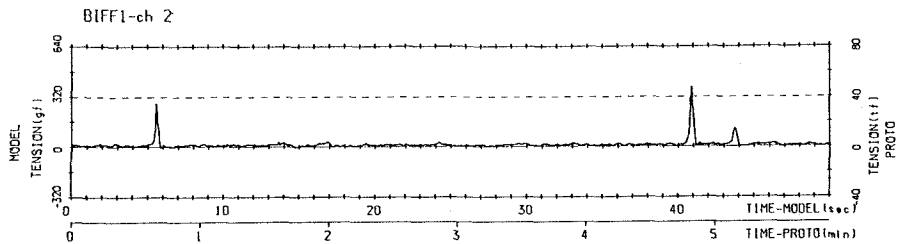


図-4 張力の時間変動波形

なってくると、衝撃的な鋭い波形を持つ張力が作用することがわかる。本実験では、明確なピークを持つ波形が生じたときのピーク張力を係留張力の1つのデータとし、計測期間中に出現したピーク張力の中の最大値を最大張力 T_{Rmax} 、それらのピーク張力の平均値を平均張力 T_{Rave} とした。規則波の場合でも、ピーク張力は一定せず、各波毎に異なることもあるので、不規則波と同様に最大張力および平均張力を計算した。

図-5は、ブイ係留チェーンおよびアンカーチェーン張力を、前側係留の場合について比較したものである。図-5では不規則波を作用させたときの最大張力を示した。 $T_{Rmax/anchor}$ および $T_{Rmax/buoy}$ はそれぞれアンカーチェーンおよびブイ係留チェーンの最大値を示す。有義波周期が14および16sの時は作用張力は小さく20tf以下であり、ブイ係留チェーン張力の方がアンカーチェーン張力よりも大きくなる傾向がみられる。周期18sのとき、張力は大きく40tf以上になる。その絶対値はブイ係留チェーン張力の方が十数%アンカーチェーン張力より大きくなる。ブイ係留チェーン張力とアンカーチェーン張力は、前側係留の場合相関関係があり、ブイ係留チェーン張力が大きくなるとアンカーチェーン張力も引っ張られて大きくなる。このことから、ブイ係留チェーン張力によって4つ目ピースが浮き上がり、アンカーチェーンも引っ張られた状態となることがわかる。このとき、アンカーチェーンのアンカー側の張力も周期18s、波高9mの場合には40tf以上の張力が作用しており、係留ライン全体が1直線に近い状態となっていることが推測できる。ブイ係留チェーン張力がアンカーチェーン張力より少し大きくなる傾向を示す原因としては、アンカーチェーン長が55mで長いので、懸垂力による張力低減効果が若干働いたためと思われる。

図-6は、係留方式を比較したもので、規則波を作用させたときのブイ係留およびアンカーチェーン張力を(A)前側係留および(B)後側係留について示したものである。白抜き記号で示したブイ係留チェーンの場合には、前側および後側係留の場合の差は生じず、ほぼ同じ平均張力が測定できた。すなわち、波向が変化してもブイ係留チェーンに作用する張力は変化しないことがわかる。したがって、実験においても、どちらの係留方式で実験しても同じ結論が導ける。黒い記号で示したアンカーチェーン張力は、後側係留の場合それほど大きくならず、最大で5tf程度であり張力が作用しない場合もあった。前側係留の場合にはアンカーチェーン張力は大きく、 $T=12s$ 、 $H=11m$ のとき11.48tfになった。したがって、後側係留の場合には、ブイ係留チェーン張力はシンカー側へは伝わるけれどもアンカーチェーンへは伝わらず、アンカーチェーンが伸びることはないことがわかる。しかし、後側係留の場合には $T_{1/3}=18s$ 、 $H_{1/3}=9m$

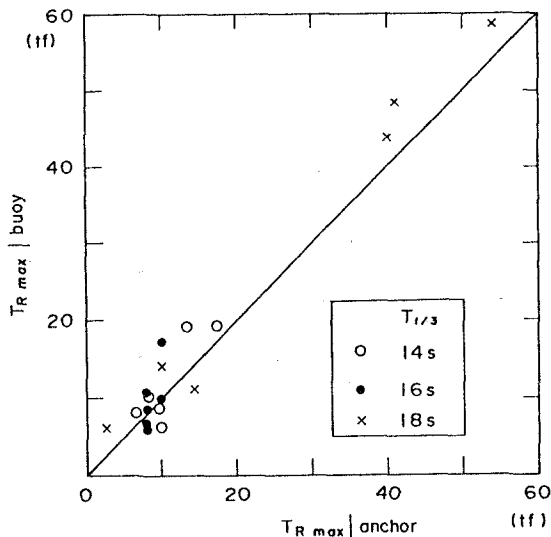


図-5 ブイ係留およびアンカーチェーン張力の比較

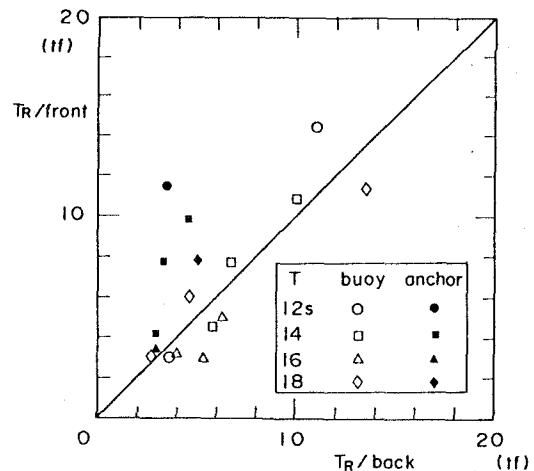


図-6 前側および後側係留における張力の比較

の不規則波を作用させたときシンカーが浮き上がり設置位置が移動する現象がみられた。シンカーが移動してしまうとブイの設置位置が変化し、数点のブイで船舶に係留する場合には、計画した係留点で係留できない場合があり問題が生じる可能性がある。現地では設計波の卓越波向が 180° 程度変化するような場合はあまりないので、アンカーの把駐力に問題がなければ、波向に対して後側係留となるような係留方式をなるべく避けた方がよい。ここで、本係留ブイ設備のアンカー把駐力について検討する。通常、アンカーおよびアンカーチェーンの水平力に対する抗力はアンカー自信の把駐力および海底に接しているチェーンの海底面との摩擦力の和で示される。しかし、本実験ではアンカーチェーンが延びることが考えられるので、アンカーの把駐力のみを考慮する。係船浮標に関する設計基準と標準設計（運輸省港湾技術研究所設計基準部資料No. 11, 1965）にしたがうと、アンカーの把駐力は底質条件にしたがって次式で示される。

軟泥	$T_A = 8W_A / 3$		
硬泥	$T_A = 5W_A / 3$		
砂	$T_A = 3W_A$	ここで、	T_A : 把駐力 (tf)
平岩	$T_A = 0.4W_A$	W_A : アンカーの水中重量 (ton)	

底質条件を砂質として、1つのアンカー重量を 15ton とすれば、

把駐力の合計は 90tf となる。前側係留の場合にアンカーに作用する最大張力は 54tf であるので、アンカーが移動することはない安全である。底質条件が悪い場合にはアンカーの重量を大きくすればよい。

図-7 は前側係留時のブイ係留チェーン張力と波形勾配の関係を調べたものである。図-7 (1) は規則波作用時の波形勾配 H/L と平均張力の関係を示したものである。周期 16s の場合を除いて、各周期において波形勾配が大きくなると平均張力は増加する。ただし、同じ波形勾配でも周期によって張力は異なる。たとえば、 H/L が 0.055 の時、周期が 14s 以上の場合には 10tf 以上の張力が作用するが、周期が 12s のときは 3tf 程度にしかない。図-7 (2) は不規則波を作用させたときの最大張力と、有義波高・周期で計算した有義波形勾配 $(H/L)_{1/3}$ および最大張力に対応する最大波から計算した波形勾配 $(H/L)_{\max}$ との関係を調べたものである。周期 18s のときは図で破線で示したように最大張力は波形勾配に比例して大きくなる。しかし、他の周期のケースでは、波形勾配が同じでも最大張力が異なる場合もあり波形勾配が変化しても最大張力は大きく変化していない。以上のことから最大張力は波形勾配と大きな相関はなく、別のパラメーターから評価する必要がある。

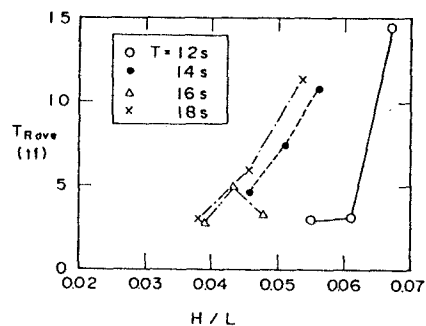
ブイが波によって運ばれることによって大きな張力が作用するものと考え、波高が大きいほどまた波長が長いほど張力は大きくなると考えられる。そこで1波が持つエネルギーを代表するパラメーターとして H^2L を考えた。図-8 は不規則波を作用させたときの前側係留のブイ係留チェーン張力の最大値と最大張力を発生させたと考えられる最大波の H^2L との関係を示したものである。データにはかなりばらつきがあるものの、 H^2L が大きくなると最大張力も大きくなる関係がある。両者の相関を最小2乗法を用いて調べると、

$$T_{R\max} = 7.7 \times (H^2L)_{\max} \times 10^{-4} - 13.7$$

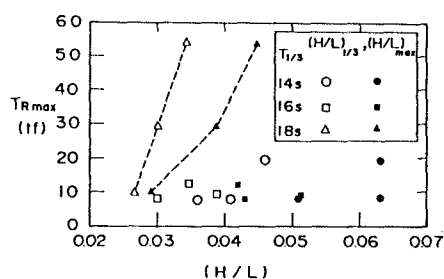
$$\text{相関係数 } r = 0.87$$

となり、相関関係が認められる。したがって、衝撃張力の最大値は作用する波の1波当たりの全エネルギーと大きく関係しており今後の検討が必要である。

図-9 は不規則波作用時におけるブイ係留チェーン張力の各ピーク張力の超過確率を調べたものである。図の



(1) 規則波



(2) 不規則波

図-7 波形勾配と平均張力の関係

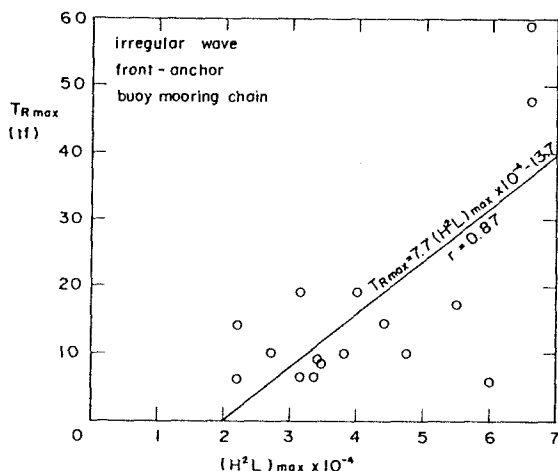


図-8 H^2L と最大張力の関係

横軸はピーク張力を平均張力で除した無次元量である。図中の実線は出現確率がレーリー分布にしたがうとして理論的に求めた超過確率である。作用波の波高分布はレーリー分布にしたがい、その確率密度関数 $p(x)$ および超過確率 $P(x)$ は次式のように表される。

$$p(x) = \frac{\pi}{2} x \exp\left[-\frac{\pi}{4} x^2\right] \quad : \quad x = H/\bar{H}$$

$$P(x) = \int_x^\infty p(\xi) d\xi = \exp\left[-\frac{\pi}{4} x^2\right]$$

図-9の記号で示したピーク張力の超過確率はレーリー分布に従わず、張力が増加しても超過確率はほとんど変化していない。たとえば、波の場合、平均波高の3倍の波高を持つ波が現れる超過確率は0.001、すなわち1000回に1回であるのに対して、張力の場合20回に1回程度は平均張力の3倍程度のピーク張力が発生する。すなわち、波高とピーク張力は線形な関係を有しておらず、大きな張力の発生する確率が非常に高い。このことから、ピーク張力は波高の2あるいは3乗に比例するような非線形関係にあり、図-8で張力と関係するパラメーターとして H^2 を用いたことは妥当性がある。

4. 弾性体による衝撃張力の低減効果

本実験で測定した衝撃張力の最大値は60tf程度であり、チェーンの許容荷重に比較すると1/3程度で小さい。しかしながら、衝撃的な力が作用すると、シャックル等の接合部に応力の集中が起こりチェーン自体の破断は生じなくても、接合部に破損が生じる可能性がある。また波高が大きくなると、シンカーが飛び上がるように運動する現象も見られ、シンカーの安全性が小さくなる。ここでは、衝撃張力を吸収するような弾性体を係留ラインの中に組み込んで衝撃的な張力の低減を図った。弾性体としては、ブイとチェーン接合部にダッシュボット構造を組み込んだ機構、チェーン自体に弾性を持たせる機構などが考えられる。本実験では、弾性チェーンを用いる方式を検討した。チェーン環とチェーン環の間にゴムを充填しチェーン全体をゴム材でコーティングしたチェーンは「ラバーチェーン」と呼ばれる。本実験では、ブイ係留チェーンのブイ側の10mをラバーチェーンで置き換えたものとして実験を行った。

図-10にラバーチェーンの伸び特性を示す。実線で示すように、ラバーチェーンは長さ10mのとき25tf以下の作用張力の場合には、ゴム材が弾性体として機能し、チェーンの全長が大きくなり全体としてバネのような伸び特性を持つ弾性体として機能する。張力が25tf以上になると、弾性がなくなり伸びの無い通常のチェーンのような働きをする。実験では、弾性体の効果を検討するのが目的であるため図中の破線で示したような伸び率を持つ弾性バネをブイとブイ係留チェーンの間に取り付けることにした。

図-11は規則波作用時の平均および最大張力をラバーチェーンの無い場合および有る場合について比較したものである。各周期において最大波高のケースについてのみ実験を行った。黒い記号で示したラバーチェーンを取り付けた場合の張力は、いずれのケースにおいても、ラバーチェーンを取り付けないケースに比べて小さくなる。特に、ラバーチェーンを取り付けない場合に20tf以上の最大張力が発生したケースについて張力の低減効果が大きく、20tf以上の張力が発生することがなくなる。図-12は、不規則波を作用させた場合の最大張

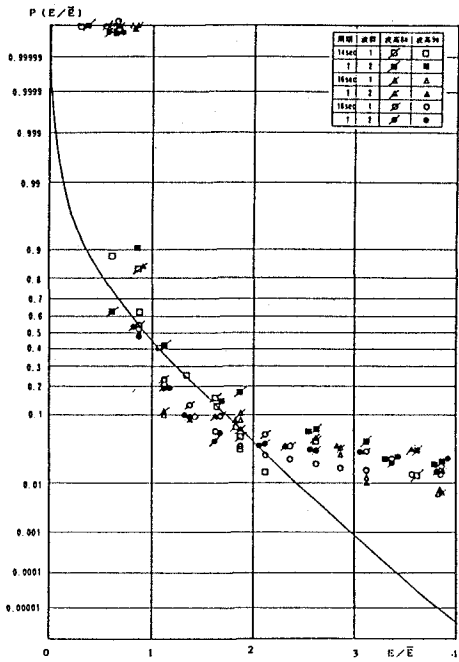


図-9 ピーク張力の超過確率

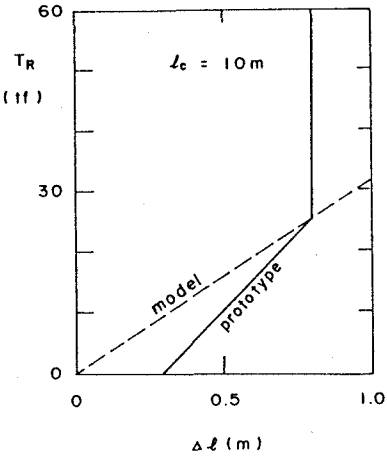


図-10 モデル弾性体の伸び特性

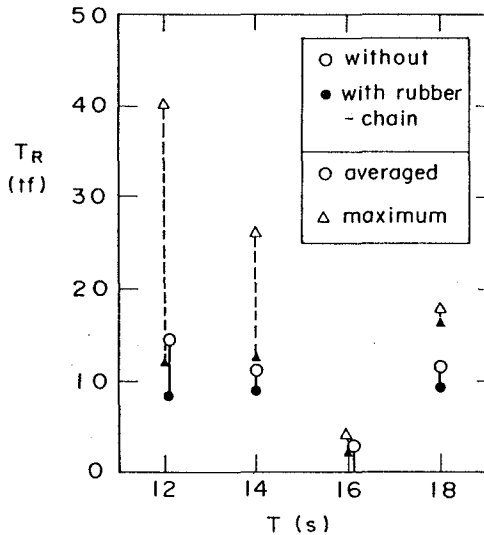


図-11 規則波作用時のモデル弾性体
による張力低減効果

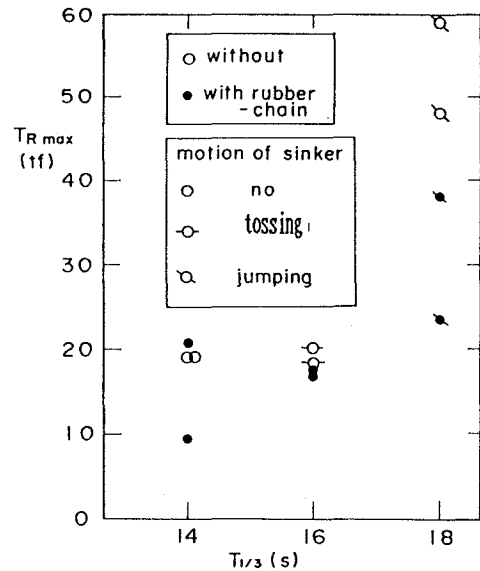


図-12 不規則波作用時のモデル弾性体の
による張力低減効果

力の変化を示す。各周期とも有意波高が最大になるケースについて示した。また、ビデオ画面から判断したシンカーの挙動についてもまとめた。図の説明で、'no', 'tossing', 'jumping' は、それぞれ、シンカーがまったく動かない、上方から引っ張られて動くけれども水底から離れない、水底から飛び上がることがある、を示す。周期が 14 および 16s のときは、ラバーチェーンを導入しても張力はほとんど変化しない。ただ、周期 16s のときに動いていたシンカーが、ラバーチェーンを取り付けると動かなくなる。周期 18s になると波長も長くなるため、最大張力は増加し、弾性がない係留ラインの場合には最大張力は 60tf に近くなる。ラバーチェーンを取り付けると最大張力は低減され、最大でも 40tf 程度である。したがって、最大張力はブイ係留チェーンの一部を弾性体に置き換えることによって、2/3 程度に低減される。ただし、シンカーは弾性体を挿入しても、飛び上がるような動きを見せることがあり、シンカー自体の運動をさらに小さくするには、もっと長い範囲にわたって弾性体を導入するべきである。以上の結果から、ラバーチェーンのような弾性体を用いると、非常に大きい張力が作用する場合に発生する衝撃張力を低減できることがわかった。

5. あとがき

本実験によって、(1) 弛緩係留されたブイ係留チェーンおよびアンカーチェーンには、大波高時に衝撃的に大きな張力が発生する、(2) 張力の大きさは、波の持つ 1 波当たりのエネルギーに関係がある、(3) ラバーチェーンのような弾性体を用いると、衝撃張力の大きさを低減することができる、ことがわかった。今後はこのような衝撃張力を定量的に推定する手法を確立するとともに、衝撃張力の低減手法に関する調査を進め、外洋に面した地点に設置される係船ブイの設計に資する予定である。最後に、ラバーチェーンの伸び特性に関する資料を提供していただいたシバタ工業㈱の関係者の方々に感謝する次第である。

参 考 文 献

- 佐尾邦久・沼田敏晴・菊野 敏(1987)；一点係留システムの解析法(その1)－基礎方程式とSALMブイの運動－、日本造船学会論文集、第162号、pp. 257-266。
- 重村利幸・林建二郎・神崎智志(1987)；外洋に面した海浜上にある係船浮標の挙動について、第34回海岸工学講演会論文集、pp. 621-625。
- 平口博弘・鹿島遼一・川口 隆(1988)；水面波形制御方式による無反射型造波機の不規則波実験への適用性、第35回海岸工学講演会論文集、pp. 26-30。