

衝撃張力低減型ブイの開発に関する模型実験

Experimental Study for Reduction of Impulsive Tension on Buoy Mooring-line

平石哲也*・冨田康大**・松森孝弘**

Tetsuya Hiraishi, Yasuhiro Tomita, Takahiro Matsumori

In some isolated islands far from the Japanese main island, port facilities like a quay, sea wall and breakwater have not been completed. A mooring buoy is widely employed to moor a vessel at the quay walls facing to the ocean. The joints of the buoy-mooring chain may be broken off when large impulsive tensions are exerted by attacks of large waves. The impulsive mooring tension can be reduced by applying an elastic rubber chain as a part of the buoy mooring chain. The tension may become less in case of soft ground.

Keywords: Buoy, Mooring tension, Hydraulic model test

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。

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、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、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数実験を行い、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。

2. 係船ブイの形状と実験方法

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、発泡スチロールの薄片を用い、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

* 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)

** 運輸省港湾技術研究所水工部

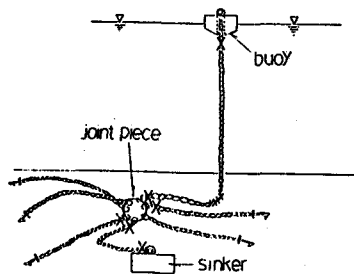


図-1 通常型の係船ブイ

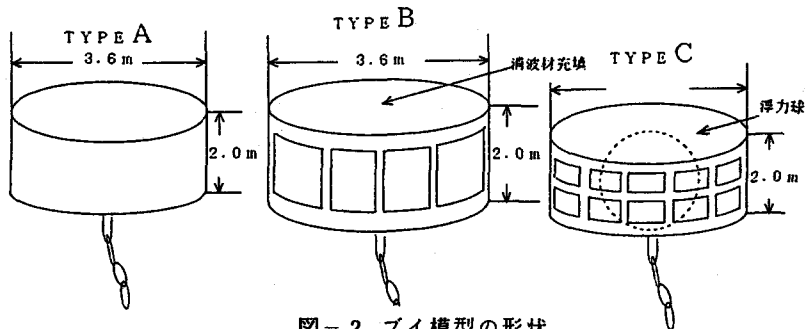


図-2 ブイ模型の形状

と同一である。タイプCは、ブイの外枠に、格子上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30 mで、係留チェーン長は40 mとした。チェーンの呼径は、一般に港内の係船ブイに用いられている $\phi 40$ mmとした。チェーンの空中重量は単位長あたり35 kg/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は実験模型の配置を示す。実験は、一面に幅28 m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。水槽の他の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構造になり、反射波が入射波を乱すことを防いでいる。実験では、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。

作用波は一方向波および多方向波とし、一方向波は、沖縄県SD島における50年確率波を参考にして、有義波周期14~16 sで、それぞれ目標有義波高が9~10 mであるとした。しかし、造波装置の性能限界のため、大波高時には長時間実験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、光易型の方向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_{max} を10~75に変化させた。

図-4は、測定した張力変動の時系列および作用波のスペクトル解析結果を示す。図の左側の上段から、タイプAのブイのブイ下およびアンカー側、さらに、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非線形性の強い現象であるため、波高に比例しているわけではなく、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

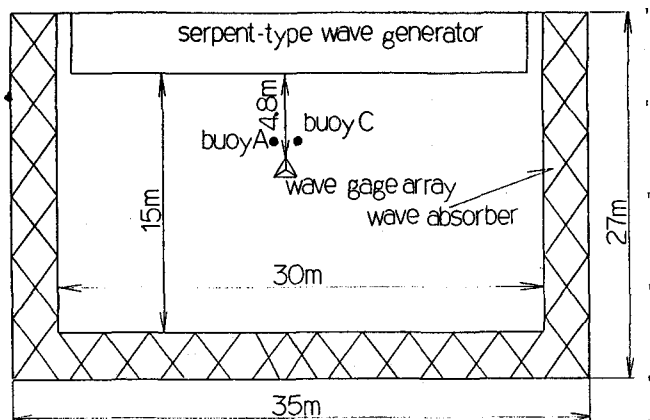


図-3 実験装置の配置

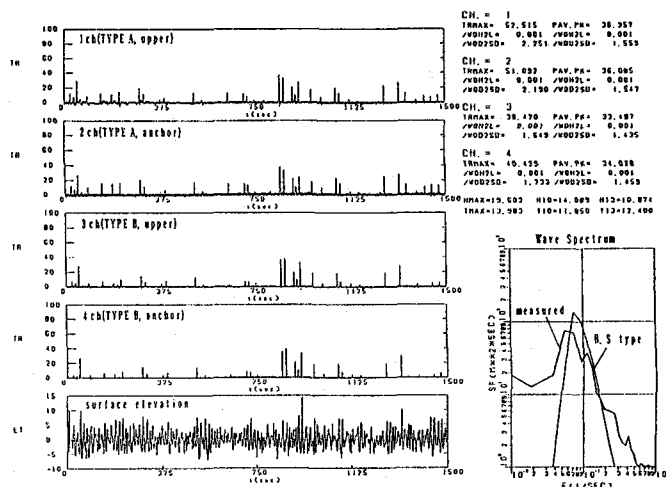


図-4 計測データの時間変化

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_{Rpeak} として整理した。また、実験波高の変動により張力の最大値も変動すると思われるので、波高の2乗で張力を無次元化した整理も行った。これは、単位幅当たりの波のエネルギーで張力を無次元化したことになる。

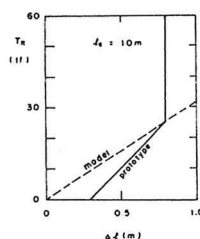


図-5 ラバーチェーンの伸び

衝撃張力の低減方法としては、ブイ本体の改良とともに、チェーンの一部を弾性体として衝撃張力を吸収する手法が非常に有効である。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めにチェーン環をゴムで覆ったラバーチェーンなどが実用化されている。図-5はラバー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、コイルバネ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-6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。

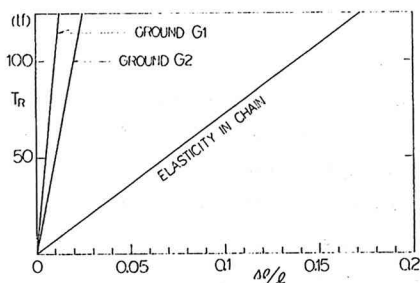


図-6 コイルバネおよび地盤の伸び

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G₀)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G₁およびG₂とする。図-6にG₁およびG₂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、バネの同様な線形の伸び特性を示す。したがって、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-1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。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。

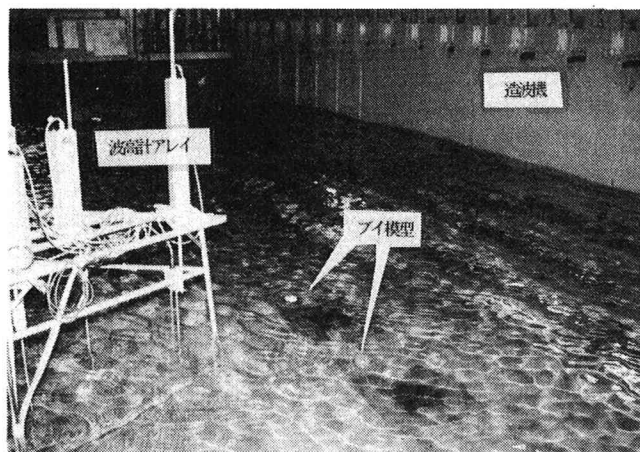


写真-1 実験の様子

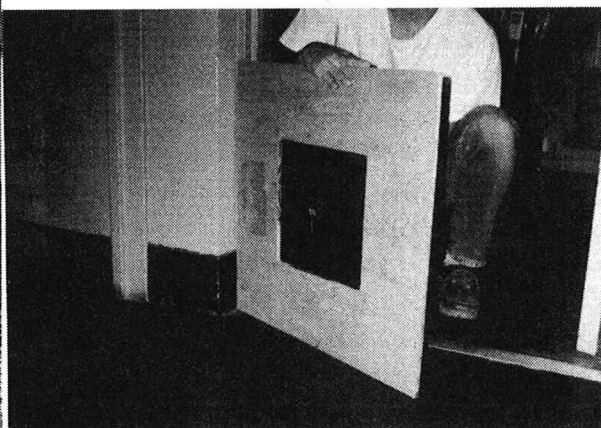


写真-2 ゴムで製作した地盤模型

3. 衝撃張力の低減効果

図-7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_{max} 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-7では、RUN-1, 2として波群による差を、TRY-1, 2として、試行回に対する差を調べた。丸および菱形の記号はそれぞれ最大および平均ピーク張力を示す。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非常に小さい。方向集中度が高くなると両者の差は特に小さくなり、 $S_{max}=7.5$ 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における4回の計測値の平均値をケースの代表値とした。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ことわかる。したがって、一方向波および方向集中度が高い多方向波の場合には、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、方向集中度が高くなり一方向波に近くなるほど、張力は大きくなる。

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、チェーンが多く方向へ引っ張られるためと思われる。したがって、 $S_{max}=5$ のケースについては、張力の大きさを4回の試行では代表することができないので、ブイタイプによる最大張力の比較などの場合には $S_{max}=5$ のケースは用いないことにした。

図-7(2)は、アンカー側の張力を示したもので、図-7(1)に示したブイ側のチェーン張力と同様に、 $S_{max}=5$ の場合にはデータのばらつきが大きく、平均値を代表値とすることは困難である。 S_{max} が大きくなるとデータのばらつきが小さくなり、標準偏差は10tf以内になる。また、ブイ下張力の場合と同様に $S_{max}=5$ の場合を除くと、方向集中度が大きくなり一方向性が強くなると波向の範囲が小さくなりデータのばらつきは小さく、また全エネルギーが同一の方向からくるために最大張力および平均ピーク張力は大きくなる。従来の設計においては、波を一方向波として考えていたので、図-7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、波の方向集中度が低い場合には過大な値を与えることになる。しかし、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り経済的な設計が可能となる。

図-8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、一方向波および $S_{max}=7.5$ 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る。ブイタイプCの無次元張力はブイタイプAおよびBより小さくなる。方向集中度の低い場合には、ブイ

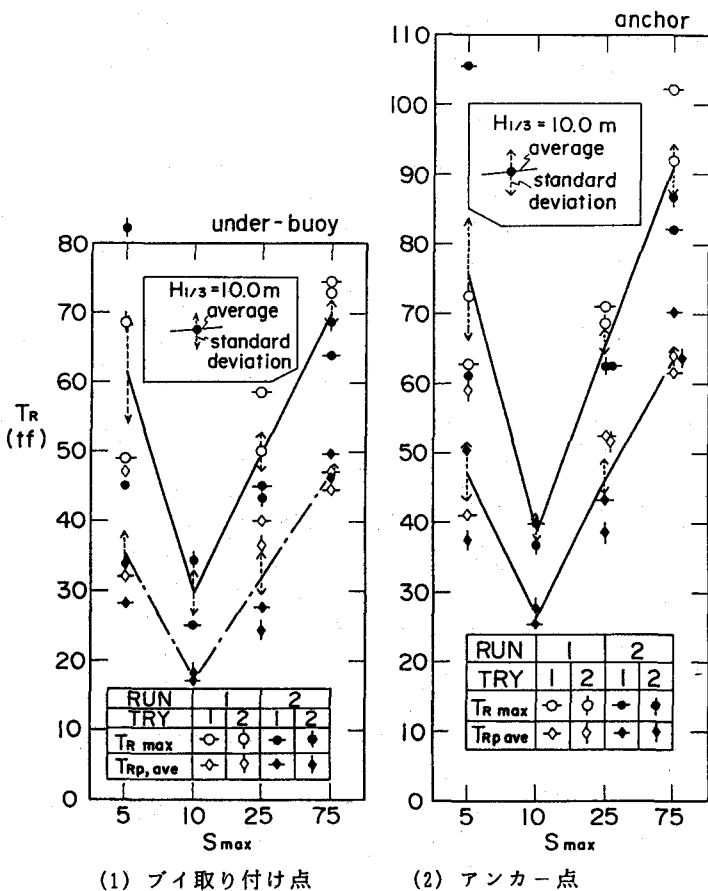


図-7 実験試行による最大張力および平均ピーク張力の変化

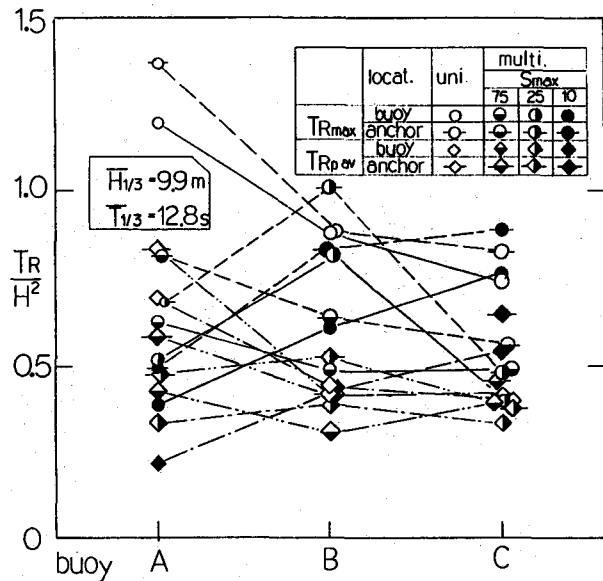


図-8 ブイタイプによる最大張力の変化

タイプAに比べて、ブイタイプBの張力は大きくなる場合がある。ブイタイプCの張力は、ブイタイプAの場合とほぼ同じである。ブイタイプBおよびCを比べると、方向集中度が低い場合には、タイプBがやや有利であり、方向集中度が高い場合にはタイプCが有利である。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、一方向波の場合だけでなく、多方向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。一方向波の場合には、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きいと言えるが、多方向波の場合には、タイプBおよびCなどの改良型のブイが張力を低減させることができるとは言えない。

図-9は最大張力および平均ピーク張力について、一方向波および多方向の場合について、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、ブイタイプCに作用する張力をブイタイプ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7.5および2.5の場合でも、タイプCを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1.0の場合には、

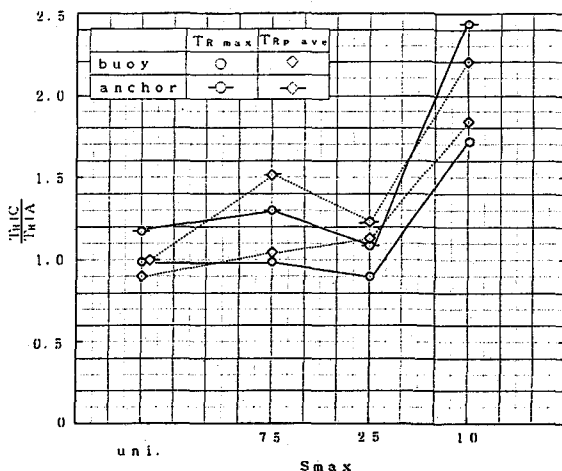


図-9 ブイタイプAとCの比較

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。

図-10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、ラバー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、一方向波、 $S_{max}=7.5, 2.5, 1.0$ の多方向波の場合には、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り、5mの弾性チェーンにより、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-11は、最も最大張力が大きくなる一方向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非常に有効であることがわかる。

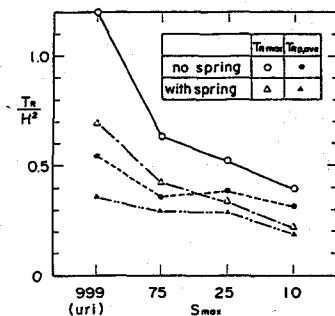


図-10 弾性体による張力の低減

図-12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。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。しかし、 S_{max} が1.0の場合には、剛性地盤においても張力はあまり大きくならないので、地盤の弾性による張力の低減効果は小さく、地盤条件を変化させても最大張力は大きく変化しない。したがって、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低減を図ることができる。図-13は、 $S_{max}=1.0$ と7.5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極大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

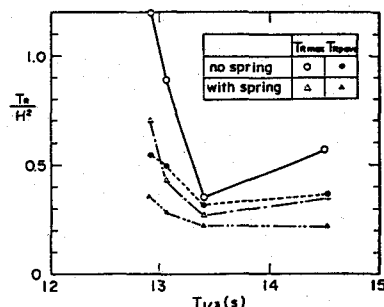


図-11 周期による作用張力の変化

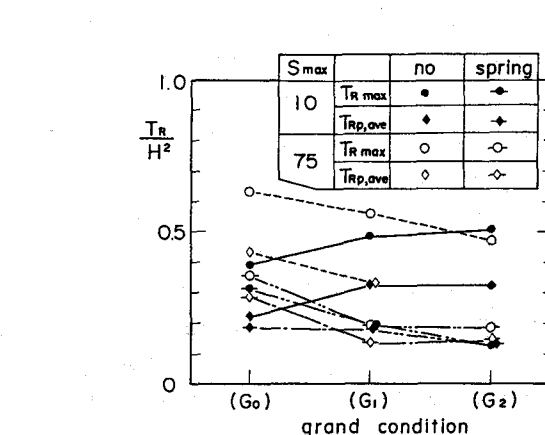
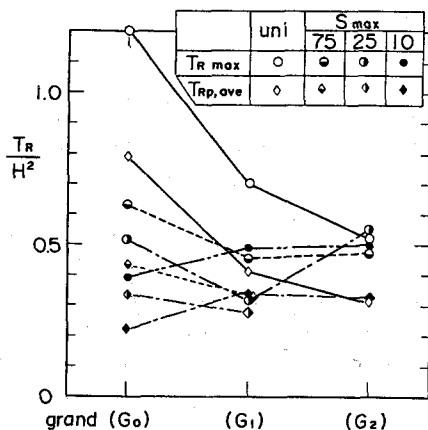


図-12 地盤条件に対する係留張力の変化

図-13 弾性を有する地盤と係留チェーンによる張力低減効果

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かとなった。

5. まとめ

係留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、ことを試みた。このうち、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。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。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。

模型実験の実施にあたっては、シバタ工業(株)よりラバー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。

(参考文献)

- 平石哲也・高山知司(1991):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, 海洋開発論文集, Vol. 7, pp.195-200.
- 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.