

波浪による衝撃張力に対する浮標システムの安全対策

平石 哲也*・富田 康大**

1. ま え が き

離島港湾における船舶係留施設および離島海浜の潜堤等の沿岸構造物の位置表示施設として、円筒型のブイを1本あるいは複数本の鋼製チェーンで海底に係留したブイ（浮標）システムが広く用いられている。これらの施設は水深15～40 mの外海に面した海域に設置されるため、設計にあたっては荒天時においても係留チェーンの切断によるブイの流出や、シンカー部分の移動による初期位置の変動が生じないように安全性に留意する必要がある。しかしながら、これまで台風期の高波によってチェーンが破損し、ブイ本体が流出してしまう事故が各地で生じている。この原因は、高波時に衝撃張力がチェーン等の係留部に作用するためと考えられる。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、高山・平石ら（1994）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に現れなかった。

本研究では、模型実験によって衝撃張力の発生状況を検討するとともに、衝撃張力を推定する数値計算モデルを開発することを目的とした。ただし数値モデルにおいては、係数の値を実験結果から評価することとしている。また、模型実験と数値計算結果を基に、現地で適用できる弾性体を用いた衝撃張力を低減させる工法を提案した。最後に、対策工を適用して施工されたブイの状況を調べ、高波浪時における浮標の現地における安全性を検討した。

2. 衝撃張力の特性と弾性体による低減効果

図-1は、沖縄総合事務局の調査による沖縄県大東島における係船ブイの破損箇所をまとめたものである。衝撃張力の発生による切断箇所は、チェーンの海底からの立ち上がり部やシンカー等との接続部に多い。立ち上がり部に被害が集中しているのは、海底との磨耗によって

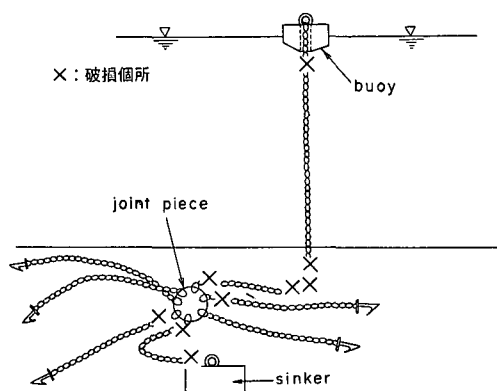


図-1 沖縄県南および北大東島での係船ブイの破損状況

チェーン環が細くなり、強度が他部よりも低くなっているためと思われる。ここでは、総幅28 mの多方向不規則波造波水槽において縮尺1/50として模型実験を実施した。この実験を「実験Ⅰ」とする。

対象としたブイは幅3.6 m、高さ2.0 m、吃水深1.0 mの円筒型で、水深30 mの地点に、長さ40 mのチェーンで直接海底に係留されている。海底は剛体とし、地盤の弾性は無視した。チェーンの呼径および単位長あたり空中重量は、それぞれ60 mmおよび35 kg/m (343 N/m)である。ブイとチェーンの連結部には“より戻し”を介して、ねじれを防ぎ、小型張力計を挿入して、張力変動を調べた。模型ブイは、造波板から4 m離して設置し、実験では、0.025 s間隔で240 s間、水位および張力を測定した。

弾性体としてはコイルバネを用い、模型チェーンの一部を切って全体長が変化しないようにバネに取り替えた。コイルバネを含む係留ラインの弾性 K_1 は、線形で $K_1=30 \text{ ton/m}$ ($2.94 \times 10^5 \text{ N/m}$)である。

作用波は単一方向不規則波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 $T_{1/3}=14\sim 16 \text{ s}$ 、有義波高 $H_{1/3}=9\sim 10 \text{ m}$ となるように設定した。造波目標とした周波数スペクトルは、Bretschneider-光易型とし、多方向不規則波の目標方向関数は光易型（合田ら、1975）とした。波の方向

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部
 ** 運輸省第四港湾建設局

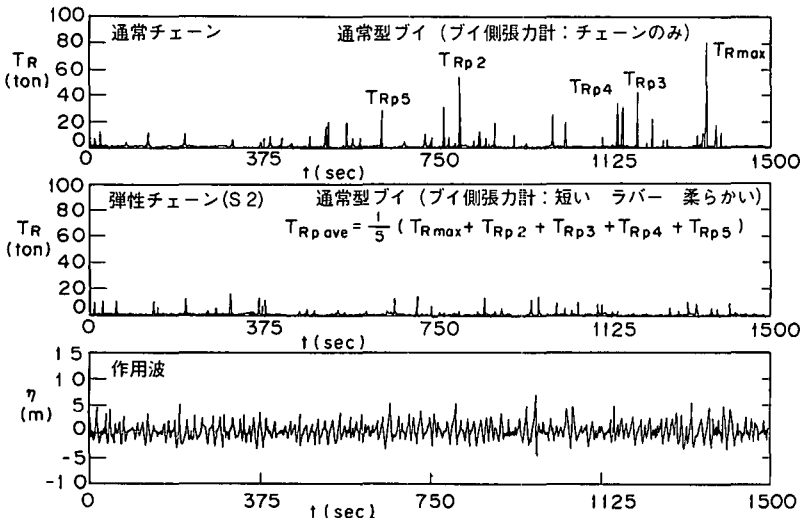


図-2 測定された水位と張力の波形

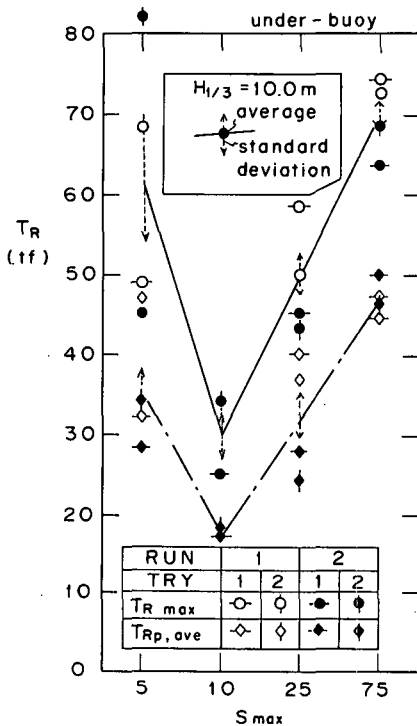


図-3 波の方向集中度に対する最大および平均ピーク張力の変化

集中度はパラメーター S_{max} で表され、 S_{max} が小さいほど、波のエネルギーは広く分散する。模型設置前に、造波された波を解析したところ、ほぼ目標となる波が再現されていた。

図-2 は、測定された水位変化および張力変動波形を示したものである。上段は弾性体を用いない通常チェーン、中段は弾性体を用いた場合を示す。測定時間中には、

頻繁に衝撃的に大きな張力が離散的に作用していることがわかり、そのピークの大きさは波高に比例していない。大きく変動するピークの大きさについて、統計的に有意な値を得るためには、ある程度平均した値を使った方がよい。そこで、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。つぎに、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。計測は、同一の波高・周期の波について2種類の波群を造波して、2回ずつ行った。

図-3 は波の方向集中度に対する T_{Rmax} と $T_{Rp,ave}$ の変化を示す。図中の“RUN-1, 2”は波群の種類を、“TRY-1, 2”は試行回数の違いを示す。図に示すように $S_{max}=5$ のケースを除くと、TRY-1 および TRY-2 の試行における差は小さく、 S_{max} が高くなると、より小さくなる。波群1と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%である。そこで、合計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、試行間におけるばらつきが小さくなる。

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波の性質が単方向波に近くなるほど、張力は大きくなる。したがって、係留張力は単方向波を作用させた場合に大きくなるのがわかる。これは、単方向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ものと思われる。

$S_{max}=5$ の場合には、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伝播するために、ブイの移動方向が広く分散するためと思われる。また、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ので(平石ら, 1994)、その増加した横方向の波力成分が影響している可能性もある。

図-4 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、通常および弾性チェーン

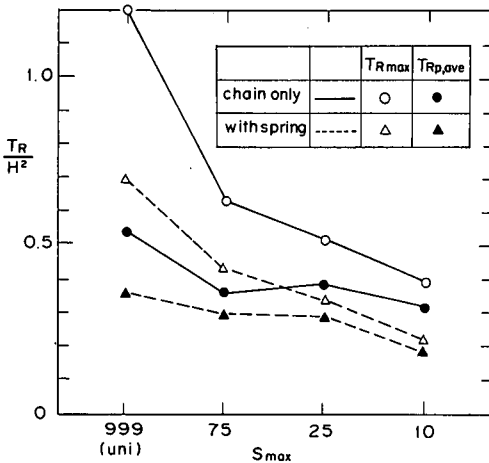


図-4 弾性体による張力の低減率と波の方向集中度

を用いた場合に、それぞれ丸および三角印で示した。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、単一方向波と多方向波の場合ともに、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、6〜7割に低減される。したがって、チェーンの弾性は、波の方向集中度に係わらず、衝撃的に作用する張力を低減することに最も効果がある。

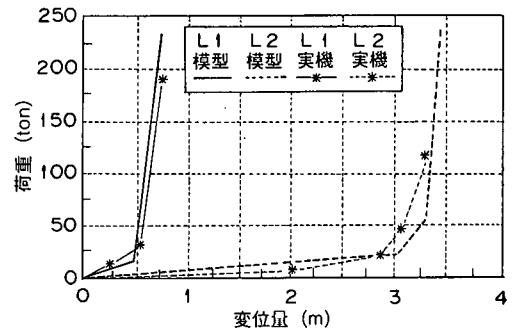
3. 弾性チェーンによる衝撃張力の低減効果

実験Ⅰによって、衝撃張力の低減法としては、弾性体を挿入する手法が効果的であることが判明した。そこで、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、より実用的な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した。これを“**実験Ⅱ**”とする。

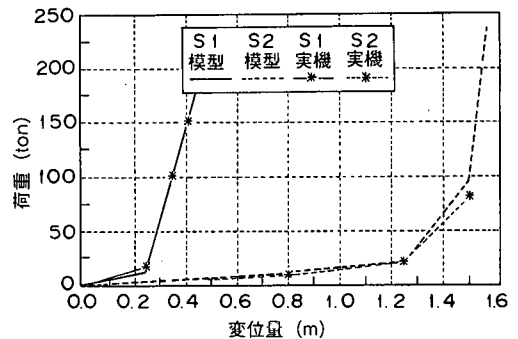
ここで検討した弾性体は、チェーン環の磨耗防止用に開発されたゴム材でチェーンを被覆したものである。これを以後“弾性チェーン”と呼ぶ。弾性チェーンではゴム材が隣り合うチェーン環の間にも充填されるため、チェーン環同士が接触せず、ある作用張力まではゴム材の圧縮によって弾性効果を発揮できる。実験では、衝撃張力がより出現しやすい状態を作るために、ブイの吃水線から海底の固定ラインまでの係留ライン長を**実験Ⅰ**より短い35 mとし、実験縮尺は、1/25の大縮尺を採用した。

実験では、使用チェーンを(i)すべて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(Sタイプ)、(iii)使用チェーン全体を弾性チェーンとした場合(Lタイプ)について検討した。

図-5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と模型チェーンの伸び率を示す。使用するゴ



(1) Lタイプの場合



(2) Sタイプの場合

図-5 係留ラインの伸び率における実機と模型の比較

ムの材質と初期のチェーン環の隙間によって伸び特性は異なるので、弾性については、柔軟性の豊かなもの(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。工場試験による実物の弾性チェーンと模型の伸び特性を比較すると、LタイプおよびSタイプともに両者はよく一致し、模型精度が高いことがわかる。

実験Ⅱは、最大水深2.6 m、幅20 m、長さ50 mの単一方向不規則波造波水路で行った。計測時間は現地換算2400 sで、この間170〜200波が作用し、 T_{Rmax} 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られる。 T_{Rpave} は、5個の極大値の平均であり、ほぼ1/40最大波 $H_{1/40}$ に対応した作用張力になる。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。

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

図-6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、チェーン長よりも、チェーンの伸び特性に大きく影響され、タイプ2を用いる方が効果が大きい。

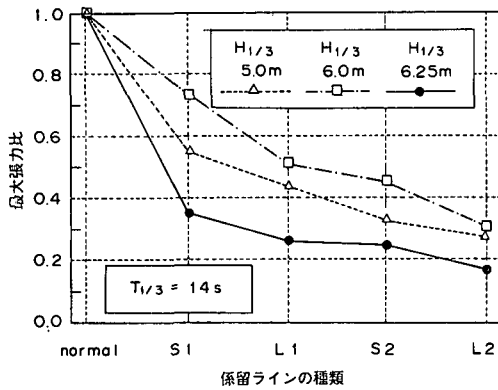


図-6 弾性チェーンの種類による最大張力の変化

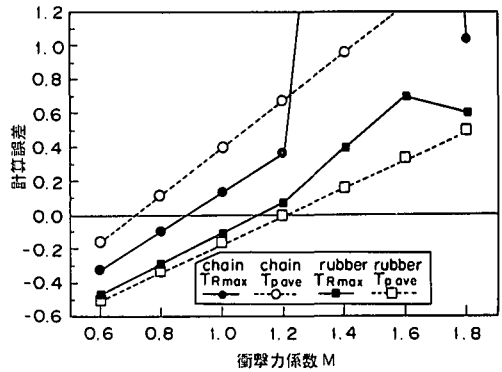


図-7 作用張力の推定値と実験値の比較

4. 衝撃張力低減効果の推定

数値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仮定して、その最大値は次式で表わす。

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

ここで、 α は、水粒子速度が実験値と一致するように導入した補正係数で、 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。

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

ここで、 m_B は、ブイ本体の水中重量で、 κ は、ブイ周りの水体を考慮する質量係数である。 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、計算できる。合成弾性率 K は、通常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 より次式で求める。

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

弾性チェーンの伸び特性は、図-5より読み取り、通常チェーンの伸び率は、高山、平石ら(1984)に従った。

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

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 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

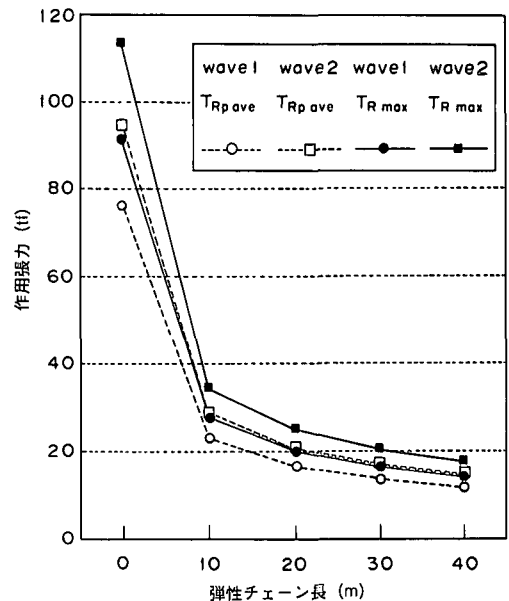


図-8 弾性チェーン長による最大張力の推定値の変化

値と比較を行った。このとき、 $T_{R\max}$ の推定には $H_{1/200}$ を、 T_{Rpave} の推定には、 $H_{1/40}$ を用いた。計算結果と実験結果を比較した図-7は、通常チェーンとタイプ2の弾性チェーンに対して、推定値と実験値を示したもので、縦軸に実験値に対する推定値の誤差の割合を表わした。図からタイプ2の弾性チェーンでは、係数 M を1.2とすると推定値が実験値に一致することが判る。同様に他タイプについて係数を求めると、弾性の小さいタイプ1では $M=1.0$ 、通常チェーンでは $M=0.8$ となった。

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-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

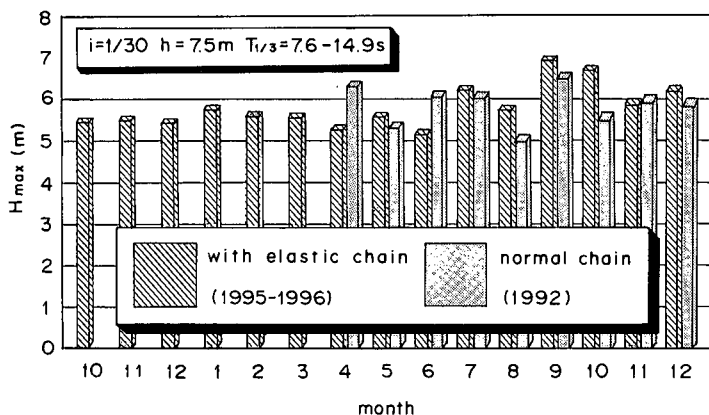


図-9 プイ設置期間中の最大作用波高

と平均ピーク値を示した。作用波の条件は2種類で、WAVE 1が $H_{1/3}=6\text{ m}$, $T_{1/3}=10\text{ s}$, WAVE 2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、80~115 ton ($7.84 \times 10^5 \sim 1.13 \times 10^6\text{ N}$)の大きい衝撃張力が作用するが、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、特に最大と平均ピーク張力の差が小さくなることから、係留ラインには定常的に同程度の張力が繰り返し作用し、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。

5. 弾性チェーンの現地における適用性

数値計算では、係留ラインの一部を弾性チェーンに置換するだけで張力の低減効果が高いことを示したが、現地の施工においては、2種類のチェーンを用意し、接続する作業が煩雑になるため、全係留ラインを弾性チェーンで作成するが多い。ここでは、同一海域で通常チェーンと弾性チェーン双方が使用された場合を比較する。

東京都大島町東岸の筆島海岸では、潜堤の設置位置を示す浮標として水深5.5 mの地点にブイが設置されている。当初、1992年4月に呼径22 mm、長さ15 mの通常チェーンを用いて直径1.2 mのブイが設置されたが、1992年12月の調査では、チェーンが破断しブイが流出

していた。対策としては、チェーンの呼径を太くすることも考えられるが、通常のチェーン環の径は、磨耗により片側で年間2~4 mm小さくなるため、安全性を考慮して、弾性チェーンが採用された。その呼径は22 mmで、被覆を含めた直径は150 mmである。弾性チェーンを用いたブイの設置時は1995年9月で、1997年1月まで被害が生じていない。

図-9は、ブイ設置期間中の最大作用波高を整理したものである。計算では、波浮港における月別最大有義波高を換算沖波とし、潮位を考慮してブイ設置点の水深を7.5 mとして、合田の碎波変形モ

デル(合田, 1982)で、最大波高を求めた。斜線柱体で示した弾性チェーン設置期間中には、被災を受けた1992年の設置時より、大きな波高が作用しているにもかかわらず被災が無く、弾性チェーン工法の適用性が高いことがわかる。

謝辞: 本研究では、沖縄開発庁沖縄総合事務局、東京都河川局、(株)ゼニライトブイ、シバタ工業(株)より資料を提供していただいた。現地波浪データは、当所の全国港湾海洋波浪情報網より取得した。関係者に深く感謝する次第である。また、横浜国立大学合田良実教授ならびに京都大学高山知司教授から、計算モデルに関して懇切な御教示をいただいたことに謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 合田良実・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, 45 p.
- 合田良実(1982): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 54-66.
- 高山知司・平石哲也・関田欣治・鳥居正志 (1994): 多点係留ブイパースにおける水工学的諸問題とその対策, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 956-960.
- 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, 28 p.
- 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.