(昭和 61 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

浮体式海洋構造物の緊張係留に関する研究 (第 3 報)

—複合係留索ラバーチェーンの設計

正員 工 藤 君 明* 正員 生 駒 信 康**
正員 荒 川 仁**

Study on the Tension Mooring of the Floating Ocean Structure (3rd Report)

—Design of the Rubber-Chain

by Kimiaki Kudo, *Member* Nobuyasu Ikoma, *Member*
Hitoshi Arakawa, *Member*

Summary

Japan Marine Science and Technology Center plans to execute TLP sea test in this and next years. The site is 40 m deep and 3 km off Yura harbor, Yamagata prefecture. An outline of the TLP and the basic design results are described in the 2nd report. In the tension mooring system, the rubber-chain which is a chain filled and covered with an elastomer, will be applied in order to absorb the shock loads, and prevent the mooring line from locally abrading.

This paper presents the fundamental test results of the rubber and the detail design and 1/3 model tests results of the rubber-chain. The tension elasticity of the rubber-chain is widely disposable with rubber hardness and the allowance ratio which is defined as the ratio of the rubber parts got between the chain links to the total rubber-chain length.

In this design, the rubber hardness 50 and the allowance 26 mm are finally selected for the 10 m long and ϕ 50 grade IV chain.

1 緒 言

海洋科学技術センターは昭和 60 年度から科学技術庁の委託により「緊張係留方式の実海域実証研究」を実施しており、昭和 61 年度には実海域実験を行う予定にしている。実験海域は山形県鶴岡市由良港 3km 沖合の通称「沖のめぐり」と呼ばれている海底丘一帯 (Fig. 1) であり、地元関係者の了解を得ている。実海域実験の概略想定図を Fig. 2 に示す。緊張係留システムの基本設計の結果を前報で紹介してあるが¹⁾、その後さらに検討を行い若干の修正を加えたものである。

本研究では実海域実験用浮体構造物の緊張係留索の一部にチェーンとゴムの複合係留索 (以下ラバーチェーンと呼ぶ) を使用する。ラバーチェーンはチェーンリンクの間隔をあけて配列し、ゴムを充填・被覆した構造になっており、チェーンの高張力とゴムの弾性の両機能を有

Fig. 1 Test site of the TLP

* 海洋科学技術センター

** シバタ工業 (株)

Fig. 2 General view of the TLP

している。ラバーチェーンは耐衝撃性に優れており、また被覆ゴムによってチェーンの腐食や摩耗が防止できるなどの特長がある。緊張係留方式の実海域実証研究においては、衝撃荷重の緩和、海面近傍におけるチェーンの腐食防止、緊張係留索とフーティング下端部との接触による摩耗防止、さらに緊張係留索とシンカーの接合部に砂が侵入するために起こるチェーンリンクの局部摩耗による破断事故の防止などの効果を期待している。

本論文は、ラバーチェーンの設計に必要となる力学特性を把握するための基礎実験、緊張係留システムの設計条件に基づいて行った詳細設計、さらにラバーチェーン実機の定量的特性評価のために実施した1/3モデルの引張試験・衝撃試験・曲げ試験の結果をまとめたものである。

2 ラバーチェーンの基本特性

2.1 ラバーチェーンの基本構造

ラバーチェーンの概略構造および断面構造をFig. 3に示す。ラバーチェーンはチェーンをゴムで被覆するだけでなく、チェーンリンク間にもゴムを充填し、さらにチェーンとゴムを完全に接着させて伸縮可能とした弾性構造である。

チェーンとチェーンの間隔 a を余裕量と呼び、ラバーチェーンの全長 l に対する全余裕量の割合 $a(n-1)/l$ をラバーチェーンの公称余裕率と称する。ここで n はチェーンリンク数である。JIS F 3303 フラッシュパット溶接スタッド付アンカーチェーンの場合、最大余裕量はチェーン呼径を d とすると $0.6d$ であるから、ラバーチ

Fig. 3(a) Rubber-chain

Fig. 3(b) Sectional view of the rubber-chain

ェーンが十分長いとすれば最大余裕率は約17.6%となる。この状態は各チェーンリンクを突き合わせ、チェーンリンクが隣接するもののスタッドに接するように配列した場合を表わしている。逆にチェーンを完全に伸張させて配置した場合は0%となる。

公称余裕率はチェーンリンクの幾何学的な配列を規定するものであるが、他方ラバーチェーンの力学的な特性を表わすために余裕率を用いる。これはチェーンリンクの横断面積 $0.5\pi d^2$ を基準としたチェーンの断面引張応力 $2,000 \text{ kgf/cm}^2$ ($=\sigma_{al}$: 余裕基準応力)の荷重に対するラバーチェーンの伸び率と定義する。なお、この荷重は第3種チェーンの耐力荷重の約半分に相当している。一般に、余裕率を大きくするためには公称余裕率を大きくすればよい。また、公称余裕率が同一の場合、ゴム硬度を上げれば余裕率は小さくなり引張軸剛性は高くなる。

ラバーチェーンでは、チェーンとゴムを完全に接着した構造としている。接着を行っていないラバーチェーンの場合、連続繰り返し引張りによって力学特性が著しく低下することや、応力緩和が増大することから安定した性能を得るためには、接着は必要不可欠となっている。

被覆厚 t はチェーン径 d を標準とし、使用目的により増減させる。たとえば、特に摩耗対策を必要とする場合には被覆厚を増大させればよい。被覆厚が $0 \sim 2.0d$ 程度の範囲であればラバーチェーンの引張り軸剛性の変化は微小である。ラバーチェーンの最大伸び率は15%程度であり、被覆部の伸びも同程度であることからゴムの破断時の伸び率350%~450%と比較すると1/30以下

の低モジュラス域のため、被覆部は引張り軸剛性にほとんど寄与していないためと考えられる。ただし、曲げ剛性は断面積の2乗に比例することから、被覆厚の増加に伴うラバーチェーンの曲げ剛性の増加は無視できない。

ラバーチェーンの単位長さ当たりの重量は、標準仕様の場合同一呼び径のチェーンと比較して、空中で2～2.5倍、水中重量で1.1～1.2倍である。被覆部に金属材料粉などを混入した比重4程度の高比重ゴムを使用すれば、同一外径のまま製品重量を増加させることが可能である。

ラバーチェーンは、チェーン表面の錆や脂をサンドブラストにより取り除き、さらに接着剤処理を施してから、原料ゴムに充填剤を混合練した未加硫ゴムで成型し、加圧加熱工程(140℃)により加硫を完結させて製造されるものである。なお成型時には、数回の加圧によりエア抜き処理を行っている。

2.2 ゴムの基本特性

通常のゴム製品は、主原料となる天然ゴムや合成ゴムを単に変形加工するだけでなく、各種の充填剤を加えて化学反応(加硫)を行わせ、使用目的に適した化学的あるいは物理的な性質を与えている。

緊張係留索に使用するラバーチェーンの設計においては耐熱性や耐油性などの化学的な性質は重要でなく、主として力学特性を向上させる必要がある。ラバーチェーン構造の特徴から、チェーンリンク間では圧縮、その他の部分では引張りが同時に発生するので、あらゆる変形に対して安定した挙動を示すことが重要な設計条件となる。さらには、急激な荷重変化に追従できることや耐久性が要求される。

2.2.1 ゴム配合

原料ゴムおよび充填剤の特徴^{2),3)}、さらにラバーチェーンに使用するゴム配合の基本方針を以下に要約する。

(1) 原料ゴム (polymer)

引き裂き強さや反発弾性、および動的特性には天然ゴム(NR)が優れている。また、合成ゴムの一種であるスチレン・ブタジエン共重合体(SBR)は、力学的性質が悪く粘着性が小さいため、成形時に粘着付与剤を必要とするなどの欠点がある。しかし、SBRをNRにブレンドすることによって部分加硫現象(scorching)の回避や耐摩耗性の向上に効果がある。このため本研究では原料ゴムとしてNRを主成分とし、加工性の向上と安定性を図るためにSBRをブレンドしたものを使用する。

(2) 加硫剤 (vulcanizing agent)

ゴムは未加硫の状態では可塑性が大きく弾性が小さい。弾性を増大させるためには、ゴム分子(鎖状高分子)間に架橋(加硫)反応を起こさせる必要がある。ここでは、比較的自由に加硫条件を調節できる硫黄を加硫剤と

して使用する。

また、加硫時間の短縮、残存硫黄量の減少、表面への浸出防止、さらに加硫点の均一化による品質の向上などを図るために加硫促進剤(vulcanization accelerator)を使用する。

(3) 補強剤 (reinforcing agent)

ゴムの硬度および耐摩耗性を向上させるために、補強性の強いカーボンブラックを使用する。ここでは特に、カーボンブラックの粒径が小さく接触面積が大きくなるために引張応力を高めることができ、さらに軟化剤の吸油量が大きいファーンズブラック(HAF-HS)を使用する。なお、ゴム硬度はJIS K 6301に規定される試験方法で定義され、0～100の値をとる。主に補強剤と軟化剤の量により決定されるが、ラバーチェーンに使用する場合にはゴム硬度50～75程度の範囲が妥当である。

(4) 軟化剤 (softener)

未加硫時のゴムの可塑性や粘着性を増大して、充填剤の混入および分散性を向上させ、さらにゴムの成形加工性を向上させるために、軟化剤としてオイルを使用する。

(5) 老化防止剤 (antioxidant)

ゴム物性の劣化を防止するために、パラフィンを配合する。これは表面に滲出して被膜を造り、内部を保護する機能がある。

2.2.2 ゴムの力学特性

ゴム状弾性体において、単純で一樣な変形を受けた時の応力 σ は一般に次式で示される⁴⁾。ただし、 σ は初断面に対する見かけの応力である。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= G(\lambda - \lambda^{-2}) \\ G &= \rho \kappa T \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 ρ : 網目鎖数(架橋点の数)、 T : 絶対温度、 κ : ボルツマン定数、 G : セン断弾性率、 λ : 伸長比 $= 1 - \Delta$ (Δ : 圧縮率)である。ただし(1)式は $0.5 < \lambda < 1.2$ で有効である。

また、セン断弾性率 G と硬度 H_s の関係は近似的に次式で示される⁵⁾。

$$H_s = G / (G + G_{50}) \times 100 \quad (2)$$

ただし、 G_{50} : 硬度50のゴムのセン断弾性率(天然ゴムで $7 \sim 9 \text{ kgf/cm}^2$)である。

これらのことから、硬度 n をもつゴムの力学特性が分かておればゴム硬度がある程度変化しても、この力学特性は次式を用いて推定することができる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= K_0 \cdot g(\Delta)_n \\ K_0 &= G/G_n \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし、 $g(\Delta)_n$: 硬度 n のゴムの力学特性曲線より回帰される関数、 K_0 : 硬度 n のセン断弾性率 G_n を基準とした比例定数である。

Fig. 4 Typical compression of rubber disc without adhesion ($d_0 = 40$ mm, $h_0 = 20$ mm). $g(\Delta)_{66}$ is regressed and others are estimated with it.

Fig. 5 Compression stress and tension stress (Compression: rubber disc without adhesion, Tension: rubber rod)

硬度 50, 66, 79 の 3 種類の円板状ゴム (直径 40 mm, 高さ 20 mm) の供試体を用いて行った圧縮試験結果を Fig. 4 に示す。図の実線は基準とする硬度 66 のゴムの実験値にあてはめた関数

$$g(\Delta)_{66} = 2.146 \exp(7.807 \Delta) \quad (4)$$

(この場合は $K_0 = 1$ となる)

であり、これを用いて他の硬度の圧縮応力を推定している。これから推定値は実験値と比較的よく一致していることが分かる。

Fig. 6 Test piece geometries for compression tests

Fig. 7 Compression test results

ラバーチェーンのゴムには圧縮と引張りが同時に作用するので、圧縮応力 σ_c と引張応力 σ_t の比較試験を行った結果を Fig. 5 に示す。ただし、ゴムは硬度 66 のものを用いた。同一の歪率では圧縮応力 σ_c が高く、たとえば歪率 50% では $\sigma_c/\sigma_t \approx 6.5$ となっている。このことからゴムの荷重分担は、圧縮側が支配的であることが分かる。

しかし、ゴムを圧縮する場合には、受圧面積 A_P と力が作用しない自由面積 A_F との比 A_P/A_F で定義される形状率 K_s が大きくなると、ゴムの圧縮剛性は増大し、このため同一歪率では圧縮応力 σ_c は形状率に比例することが示されている⁵⁾。したがって、圧縮部分の拘束

状態の程度によりゴムの力学特性は大きく変化することが考えられる。そこでラバーチェーンの力学特性を把握するために拘束状態を変えた圧縮試験を行った。

ゴム硬度 66 の 4 種類の試験体を Fig. 6 に示す。C-1 は円板状ゴム (直径 40mm, 高さ 20mm) の上下に直径 16mm の丸棒を直交させ、ゴムを圧縮する構造である。C-2 は円板状ゴム (直径 100mm, 高さ 24mm) の上下に直径 16mm の丸棒を加硫接着した構造である。ただし、丸棒中心間距離は 26mm, 圧縮部分の最小厚みは 10mm としてある。C-3 はチェーンリンク間の受圧面積部分のみにゴムを加硫接着した構造、また C-4 はラバーチェーン (外径 70mm) であり、両者とも $\phi 16$ のチェーンを用いている。

圧縮試験結果を Fig. 7 に示す。ただし、圧縮応力 σ_0 はいずれも受圧面積 $A_p = 2.56 \text{ cm}^2$ を基準にとってある。C-1 は他の実験例と比較して全般的に圧縮応力は小さく、しかも圧縮が進行するにつれてこの部分のゴムが外部に流出してしまうので小さな圧縮荷重で容易に破断することが分かる。これに対して C-2 の場合には、接着によりゴムの移動が抑えられることになり歪が大きくなっても自由面積は増大することができず、C-1 に比べて形状率は相対的に大きくなり、したがって圧縮剛性が高くなるので圧縮応力は大きくなっている。C-3, 4 ではゴムの圧縮部分はチェーンリンクに挟まれ側方も拘束されるようになるので自由面積は C-1, 2 に比べて小さくなる。しかも C-4 では周辺のゴム部分もこの拘束に寄与しているので、剛性はさらに高くなっていることが分かる。ただし、この場合にはゴムの引張りも発生しているが、この寄与は少ないと考えられるので、すべて圧縮によるものと見なして応力を評価した。

以上のことから、ラバーチェーン構造の力学特性を決定するのは、チェーンとゴムの接着の有無、チェーンリンクの形状および充填ゴムの性状等であることが分かる。

最後にゴムの応力緩和について検討する⁹⁾。応力緩和は粘弾性材料特有の現象でありこのような材料を急激に変形させて、そのまま一定に保持しておくとき時間の経過とともに応力が低下する現象である。常温における応力緩和の原因としては、ゴム分子同志のほぐれ、ゴムと充填剤間の二次結合の脱離、あるいはゴムの流動などがあり、このため物理緩和ともいわれている。

硬度 50 のゴムについて応力緩和の簡単な圧縮試験を行った結果を Fig. 8, 9 に示す。Fig. 8 (a) はゴムの受圧面を接着しないもの、Fig. 8 (b) はゴムの両面に鉄板を加硫接着したものである。圧縮率 Δ を一定に保持した場合の初期応力 σ_0 に対する応力の低下率 σ/σ_0 の時間変化を示している。両試験体とも圧縮直後の応力緩和は

Fig. 8(a) Relaxation of rubber without adhesion

Fig. 8(b) Relaxation of rubber adhered to steel plates

Fig. 9 Reaction forces before and after relaxation, and reduction of compression stress after relaxation

激しいが、圧縮後 5 分位までには緩やかになりその後収束する傾向を示す。Fig. 9 は両試験体の圧縮率 Δ を一定として、圧縮直後の反力、15 分緩和後の反力および応力低下率をまとめたものである。応力の低下率は両試験体とも圧縮率に依存しており圧縮率が大きくなるとともに応力保持率は低下している。ただし両試験体を比較すると、接着した方が応力緩和は少なくなっていることが分かる。加硫接着をすると加圧面のゴムが鉄板により完全に拘束されているのに対して、接着をしない場合には加圧面のゴムと圧縮板との間ですべりが起こり応力緩和が助長されるためと考えられる。以上のことからラバーチェーンにおいても応力緩和の減少を図るためには、チ

Fig. 10 The effect of rubber hardness on force-deflection characteristics for rubber-chain

チェーンとゴムを加硫接着する構造とする必要がある。

2.3 ラバーチェーンの力学特性

ラバーチェーンの力学特性は、基本的には公称余裕率とゴム硬度により決定される。そこでゴム硬度の違いによる伸び特性の変化を調べるために公称余裕率を一定とし、ゴム硬度のみを変化させたラバーチェーンの引張試験を行った。応力-伸び特性の試験結果を Fig. 10 に示す。ここで縦軸はチェーンの断面引張応力である。なお、試験体は $\phi 16$ スタッドチェーンを使用し、公称余裕率は 11.5% とした。使用するゴム硬度を 66, 60, 50 と低くするにつれて引張軸剛性も小さくなり、余裕基準応力 σ_{at} の 1/2 の荷重における伸び率は 5.8%, 7.4%, 8.2% と増大している。また、このときの公称余裕率に対する割合は、それぞれ 50.3%, 64.3%, 71.0% となっている。したがって公称余裕率を同一に設定してもゴム硬度によってラバーチェーンの伸び特性は大きく変化することになるので、ラバーチェーンの設計条件に依じて公称余裕率とゴム硬度を選択する必要がある。ただし、伸び特性の変化はゴム硬度よりも公称余裕率による方が主であるため、通常はゴム硬度を決定した後公称余裕率を得る方法が妥当である。

3 緊張係留システムにおけるラバーチェーンの設計

緊張係留方式の実海域実証研究における緊張係留システムの基本設計の結果¹⁾、設計荷重を 200ton、緊張係留索 1 本当りの初期張力を 31ton、またラバーチェーンの初期張力時における最大伸びを 1m 程度とした。

当初の計画ではチェーン径 50mm、破断荷重 200ton のフラッシュバット溶接アンカーチェーンスタッド付第

Table 1 Material components of rubber (Hs50)

Material		Ratio
Polymer	NR (Natural rubber) -CH ₂ C(CH ₃)=CHCH ₂ -	85
	SBR (Styrene butadiene rubber) -CH ₂ CH=CHCH ₂ CH ₂ CH(C ₆ H ₅)-	15
Filler	Vulcanizing agent	2
	Vulcanization accelerator	1
	Reinforcing agent	80
	Softener	12
	Antioxidant	4.5

3 種を使用する予定であったが、実海域実験における安全性を考慮して第 4 種仕様のチェーン径 50mm、破断荷重 280ton のチェーンを使用することにした。

緊張係留索におけるラバーチェーンの長さは設計条件を満足できる必要最小限とし、またこのためには必要とされる力学特性を失うことなく伸び量を大きくできる硬度 50 のゴム (Table 1) を使用することにした。

ラバーチェーンの公称余裕率は理論上最大で 17.6% であるが、チェーンには許容寸法誤差があること、さらにチェーンリンクとそれに隣接するスタッド間のゴムの伸びはゴム物性より 400% 程度以下でなければならないことから公称余裕率の最大値は約 14.5% と考えるのが妥当である。一方、初期張力を作用させた時 $\phi 50$ チェーンの断面引張応力 σ は約 800 kgf/cm² となり、Fig. 10 より硬度 50 のゴムの場合には公称余裕率の 68% が伸び量となることが推定でき、したがって伸び量を 1m とすると、全余裕量は 1.47m 必要となる。これからラバーチェーンの長さを 10m とすれば公称余裕率 14.7% を確保することができる。これに全余裕量 1.47m を加えると、チェーンの自然長 l_0 は 11.47m となる。本設計の場合チェーンリンクの内長は 0.2m であることから、チェーンリンク数は 57 となり、また余裕量は 26mm とした。また浮体の前後・左右揺により緊張係留索はフーティング下端部と接触し摩耗することが考えられるのでこの部分にラバーチェーンを配置することとし、チェーンリンク外表面の被覆厚を 60mm、外径を 300mm とした。以上により得られた緊張係留システムの基本概要図を Fig. 11 に示す。

次に、緊張係留索とシンカーの接合部は浮体の動揺にともない回転撓動するので、海底付近の漂砂により局部摩耗を起こしやすく破断事故に至ることが考えられる。そこで本設計では、この部分をゴムで被覆することにより漂砂の侵入を防ぎ、局部摩耗を極力抑える構造とした (Fig. 12)。次章に述べるラバーチェーンの曲げ試験結果より被覆部の長さを 1,800mm、外径はチェーン部

Fig. 11 Schematic view of rubber-chain in TLP

Fig. 12 Schematic view of antiabrasion rubber-chain at chain-sinker connection

で 220mm, アンカーシャックル部で 300mm とした。アンカーシャックルも含めてゴムを充填・被覆した一体構造として工場生産し, 現地施工時にシンカーと接続後アンカーシャックルピン周囲の空隙部にゴム状弾性体を充填することになっている。

4 1/3 モデル力学試験

4.1 試験概要

設計条件により決定された実海域実験用ラバーチェーンの特性を検証するために 1/3 モデルの試験体を製作し, 引張試験, 衝撃試験および曲げ試験を行った。まず第一に, 引張試験によりラバーチェーンの伸び特性および経時変化による応力緩和特性を把握すること, またスナップ荷重等を想定した衝撃試験を行うことによってラバーチェーンの衝撃力の緩和効果を定量的に評価し, 安全性を検討する資料を得ることが目的である。試験体を Fig. 13 に, また試験装置を Fig. 14 に示す。試験体は実機の厳密な縮尺モデルではなく, 詳細仕様で若干異なっている。1/3 モデルの公称余裕率は 13.1% であり, また使用チェーン径は実機の 1/3.125, ゴム外径は実機の 1/3.333 である。なお試験荷重の設定はチェーンの縮尺により換算したが, 外径の差による影響は小さく無視できるからである。1/3 モデルに使用したチェーンは JIS F3303 フラッシュバット溶接アンカーチェーンスタッド付き第2種, チェーン径 16mm, 破断荷重 15.3 ton であり, 実機のラバーチェーンに使用する予定のチェーンとグレードが異なっている。しかしチェーン径は同一であり, また実機における設計初期張力の 2 倍の荷重に対応する 1/3 モデルの載荷荷重は約 6ton となり, 実用上十分な強度を有しているの, さしつかえないものと判断した。

次に緊張係留索のシンカー接合部に使用するゴム被覆材の曲げ特性を把握するために曲げ試験を行った。試験

Fig. 13 1/3 rubber-chain model

Fig. 14 Schematic diagram of tension and impact tests for rubber-chain

体の構造はラバーチェーンの余裕率を0としたものであり、ゴム外径、ゴム硬度、切り込みの有無の影響を調べた。

4.2 ラバーチェーンの引張試験

4.2.1 静的引張試験

Fig. 14 に示した試験装置により静的引張試験を行った。試験体的一方を固定し、他方端はロードセルを介して引張試験機に接続した。試験体の伸び量はインダクタンス式変位計により測定し、試験体と試験台の摩擦による影響を少なくするため外径 $\phi 15\text{mm}$ のパイプを接触面に配置した。

試験結果を Fig. 15 に示す。同図には比較のためにチェーン単独の引張伸び特性も示してある。荷重が大きくなればチェーンの伸びは無視できなくなるが、2ton 程

Fig. 15 Static force-deflection characteristics for chain and rubber-chain

Fig. 16 Change in force-deflection characteristics after cycles of loading and unloading for rubber-chain

度まではゴムによる伸びが支配的である。これはラバーチェーンの伸び特性がチェーンリンク間のゴムの圧縮に支配されていることを示すものである。

4.2.2 連続繰り返し引張試験

前節と同一の試験機を用いて、ラバーチェーンの連続繰り返し引張りによる荷重-伸び特性の変化を計測した。初期張力0、最大引張荷重 6.5ton とした場合の、繰り返し数 100 回および 1,000 回における計測例を Fig. 16 に示す。載荷時と除荷時の荷重-伸び曲線は同一にならず、ヒステリシスを描いている。ゴムには除荷しても変形が直ぐには元にもどらない、クリープという性質があるためである。また試験結果にみられるように、荷重が大きいくところでは載荷・除荷回数が増大するにつれて伸び率も大きくなっている。これは連続載荷によって、ゴムに永久ひずみが増加したことによるものと考えられる。

なお、載荷回数に伴う伸び量の変化と永久伸びは、初期張力によって異なるが、今の例では伸び量の変化は全伸び量の 1.5% 程度、永久伸びは全長に対して 0.8% 程度となっている。

4.2.3 ラバーチェーンの応力緩和

ラバーチェーンの応力緩和試験の結果を Fig. 17 に示す。縦軸の F/F_0 は、初期張力 F_0 に対する t 時間後の張力の比であり、応力保持率ともいわれる。ただし、 F_0 としては急激に載荷してから 10 秒後の値をとっている。一般にゴムの応力保持率は $\log t$ と直線関係にあるので、本試験結果にあてはめると、

$$\left. \begin{aligned} F/F_0 &= 0.7946 - 0.0783 \log t \quad (F_0 = 2,700 \text{ kg}) \\ &= 0.7358 - 0.1030 \log t \quad (F_0 = 4,350 \text{ kg}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

と表わすことができる。初期張力の違いにより直線の傾き、すなわち緩和の大きさが異なるのは、ゴムの応力保持率がひずみ量に依存していることを示すものである。

したがって緊張係留方式の実海域実証研究において、実機を設置するときには、ラバーチェーンの応力緩和特

Fig. 17 Relaxation characteristics of rubber-chain

性にに基づき、長期にわたる張力の変化を推定して所定の初期張力を保持するとともに、初期張力の再設定が必要になるものと思われる。

4.3 ラバーチェーンの衝撃試験

Fig. 14 に示した試験装置によりチェーンおよびラバーチェーンの衝撃試験を行った。試験体は静的引張試験と同一のものを使用し、引張試験機の油圧シリンダーにより初期張力を载荷させてから、重錘を落下衝突させた。衝撃荷重の大きさは重錘の落下高さを変えることにより設定した。

Fig. 18 に衝撃波形の観測例を示す。また Fig. 19 に発生最大荷重の計測結果を示す。線形パネの場合には、反力は変位に比例し、パネの吸収エネルギーは変位の自乗に比例するので、反力は吸収エネルギーの平方根に比例することになる。ラバーチェーン等の衝撃試験においても吸収エネルギーと重錘の運動エネルギーが比例するとすれば、衝撃荷重は衝突速度に比例する。したがって、Fig. 19 では横軸に衝突速度をとってデータを整理

Fig. 18 Typical time histories of impact load on chain and rubber-chain (V : impact speed of weight 275kg, F_0 : Initial force of rubber-chain)

Fig. 19 Maximum impact load-impact speed relations

した。この図から、最大衝撃荷重は重錘の衝突速度に比例するという仮定が妥当であることが分かる。

初期張力が大きい場合には、静的引張試験 (Fig. 15) から明らかのように、ラバーチェーンはチェーンと同程度の剛性となり、それゆえ最大発生荷重もほぼ等しくなっている。しかし初期張力が小さいと、この差は顕著になり、初期張力 0 ではラバーチェーンの最大発生荷重はチェーンの約 1 割程度まで減少している。

本試験結果より、ラバーチェーンは初期張力の低い領域では、衝撃力の緩和に非常に優れていることが明らかになった。緊張係留システムにおいて、スナッフ荷重が発生する条件では初期張力が解除されるので、ラバーチェーンは最大発生荷重の低減に優れた効果を発揮することが期待できる。

4.4 シンカー接合部曲げ試験

シンカー接合部のゴムの被覆寸法を決定するために、ゴム外径、ゴム硬度および被覆形状の異なる試験体を製作し、実機を想定した曲げ試験を行った。試験体を Fig. 20 に、また試験結果を Fig. 21 に示す。

ゴム外径が同一でも、ゴム硬度により曲げ状態に違いがある。Fig. 21 (a) から、ゴム硬度が高いと被覆部上端で折れ曲がりが発生していることが分かる。次に、ゴム硬度により曲げ剛性を低下させる以外に、ゴム外径を小さくした場合と、さらにチェーンに沿って被覆部のゴムをカットした場合の曲げ試験結果 Fig. 21(b) では、カットすると曲げ剛性が低くなりすぎ、被覆部上端で逆に折れ曲がることになった。

したがって本試験における被覆長さの場合、被覆部上端での折れ曲がりを極力小さくし、チェーンリンクの摩擦を抑えるためには、曲げ剛性を極端に低くする必要はなく、ゴム硬度が 50 程度であれば、外径を小さくするのみで十分対応できることが分かった。

Fig. 20 Schematic view of test pieces for antiabrasion rubber-chain bending test

Fig. 21(a) Bending profiles of normal thick antiabrasion rubber-chain

Fig. 21(b) Bending profiles of normal or notched slender antiabrasion rubber-chain

5 結 言

本研究は昭和 61 年度に実施する緊張係留方式の実海域実証研究において、緊張係留索に使用するラバーチェーンの設計資料を得るために行った試験結果をとりまと

めたものである。ゴムの基本特性を把握するための試験、実機ラバーチェーンの 1/3 モデルによる性能確認試験により、緊張係留索の詳細設計を行うことができた。ラバーチェーンは既存のチェーンやワイヤロープ等の係留索には見られない新しい機能を有する複合係留索であり、本研究の成果が今後の係留設計に貢献できれば幸いである。

最後に、本研究は海洋科学技術センターが科学技術庁より委託を受けて実施する「緊張係留方式の実海域実証研究」に対して、海洋科学技術センター、日立造船情報システム（株）およびシバタ工業（株）が緊張係留システムの設計のために行った共同研究の一部である。ここに付記して関係各位に感謝の意を表します。また本研究を遂行するにあたり、1/3 ラバーチェーンモデルの力学試験に便宜を図って下さり、さらに本研究をとりまとめるにあたり多くのご助言をいただいた通産省四国工業技術試験所の信川寿企画課長、菅坂和彦機械金属部長および榎原実雄海洋技術開発研究室長には心からお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 工藤君明, 木下 篤, 生駒信康, 西野好生, 山川賢次: 浮体式海洋構造物の緊張係留に関する研究 (第2報) 日本造船学会論文集, 第158号(1985).
- 2) 日本ゴム協会: ゴム工業便覧 (1973).
- 3) ラバーダイジェスト編: ゴム・プラスチック配合薬品 (改訂版), (1974).
- 4) 吉田 昇: 日本ゴム協会誌, 第56号 (1983).
- 5) 日本鉄道車輛工業会: 防振ゴム (1975).
- 6) 山田準吉: 改訂ゴム, 大日本図書 (1975).
- 7) Rubber in Offshore Engineering, edited by Stevenson, A., Adam Hilger Ltd (1984).