

9. 潜水調査船着水揚収システムの開発研究(第2報), —吊揚索の試作試験—

谷内 琢也*¹ 高川 真一*¹ 岡田 光豊*¹ 對馬 克己*¹ 二宮 静男*²

2,000 m 潜水調査船着水揚収装置に使用する吊揚索は、潜水調査船に加わる衝撃荷重を極力小さくし、安全、かつ円滑に揚収できるものが必要である。そのため、本装置には大直径のテトロン-ナイロン-タフレ索を使用することとしている。しかし、わが国では本システムのような実績がないため、参考とする設計データがない。そこで、索単体の強度試験および実機の着水揚収装置のシーブ配列を模擬した装置による実機と同一の長さの索のばね特性を求める試験を実施し、種々のデータを得た。本試験、ならびにその解析結果から索の強度および動的なばね特性が明らかになり、本テトロン-ナイロン-タフレ索が実船に使用可能なことが確認できた。

Development of a Launch and Retrieval System for a 2,000 m Deep Submergence Research Vehicle (Report 2), Characteristics Test of the Lift Line Installed in the A-Frame Crane

Takuya Taniuchi*³, Shinichi Takagawa*³, Mitsutoyo Okada*³,
Katsumi Tsushima*³, Shizuo Ninomiya*⁴

The lift line installed in the A-frame crane must decrease the shock load and be suitable for smooth recovery.

Therefore, we selected nylon fiber rope for this system. However, we had no data on the large size Tetron-Nylon double-braided line concerning strength, spring constant, and other properties.

Thus, we designed an experiment of this rope to obtain its characteristics, and investigated the spring constant by using the simulated model rope which was the same length and which was installed in the same sheave arrangement as in the actual A-frame crane system.

Through this experiment, the strength, spring constant in the dynamic condition, and other properties of the Tetron-Nylon double-braided line became clear. In this manner we confirmed that the rope was suitable for smooth recovery of the submersible vehicle.

*¹ 深海開発技術部

*² 川崎重工業株式会社神戸造船事業部

*³ Deep Sea Technology Department

*⁴ Kobe Works, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

1. ま え が き

潜水調査船を目的海域まで搭載運搬し、潜航前後の点検および潜航中の指揮支援をするための支援母船には、潜水調査船を着水または揚収するための着水揚収装置が必要である。

実海域における波浪中の潜水調査船と支援母船とに大きな相対動揺が生じるため、きわめて困難な作業となる。しかし、極力潜水調査船を安全、かつ円滑に着水、揚収しなければならない。

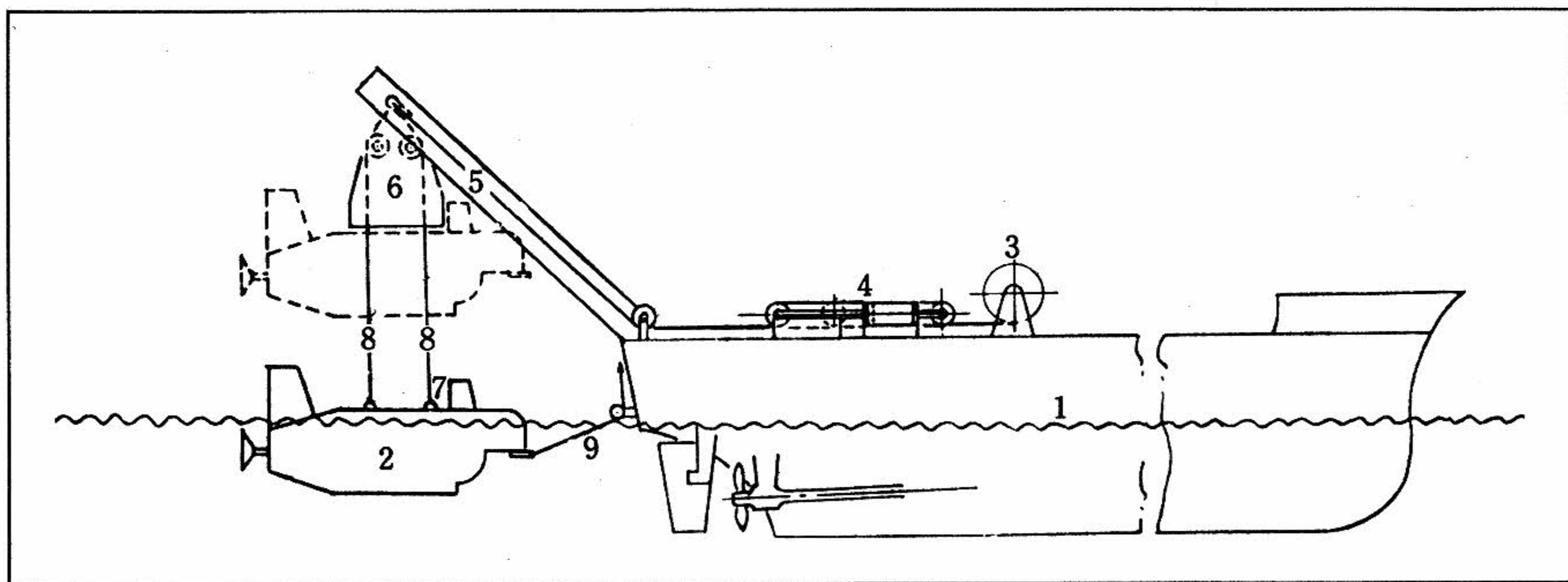
着水揚収装置の概要を図1に示す。

この装置は支援母船の上甲板後部に設置され、A-フレームクレーン、吊揚索、ホイストウィンチ、ラムランショナ、ペンダントフレーム、吊揚索先端に取付ける潜水調査船吊揚金具および曳航索などで構成され、2点2索吊型式の装置である。本装置の使用海象条件は通常、シーステイト3で着水、揚収し、潜水調査船が潜航中、急に海面が荒れてきたような非常時には、シーステイト4で揚収できることが要望されている。また吊揚

荷重として、潜水調査船の空中重量約25t が吊揚げられるようなものでなければならない。

したがって本装置では、使用する吊揚索には波浪中の潜水調査船吊揚時に加わる衝撃力を極力小さくし、潜水調査船乗員にはその影響を少なくし、かつ円滑に着水揚収できるものが望ましい。このため、吊揚索には一般の荷役用として用いられる鋼索よりも、合成繊維索のように、弾性に富んだもので、潜水調査船吊揚時の支援母船と潜水調査船との相対動揺による荷重変動を吸収緩和でき、さらに強度の大きいものが必要となる。

一般に合成繊維索として、ナイロン、テトロン、クレモナなどの3打ち索、8打ち索が用いられている。本装置ではこれらと比較して最も強度が大きく(図2参照)、適度な伸びを持つ“外層テトロン・内層ナイロン 二重組打索(商品名:テトロン・ナイロンタフレ索)”を選択した。この索は引揃えて編組みした内側の心ロープ(ナイロン)を、外側からさらに編組みされたロープ(テトロ



1. 支援母船, support ship
2. 潜水調査船, deep submergence research vehicle
3. ホイストウィンチ, hoist winch
4. ラムテンショナー, ramtensioner
5. Aフレームクレーン, A-frame crane
6. ペンダントフレーム, pendant frame
7. 吊揚金具, lift mating device
8. 吊揚索, lift line
9. 曳航索, towing rope

図1 着水揚収装置の概念図

Schematic illustration of A-frame crane equipment

ン)で包んだ構造(図3参照)で、3打ち索8打ち索に比べ、表面のおうとつが少く、断面密度が高いため、強度的にすぐれると共に、局部的な摩耗が少ないのが特徴である。

しかし実際、この索を採用するには、次のことを確認した上でなくてはならない。

- (1) 大直径索の破断荷重の確認
- (2) 末端処理方法と破断荷重の確認
- (3) “湿”の状態での強度低下の有無
- (4) 荷重と伸びの相関(静的ばね特性)
- (5) 衝撃力が加わったときの荷重と伸びの相関および静的時との相違
- (6) 索末端処理方法の相違による寿命変化
- (7) 変動負荷に対する索の動的応答特性(ばね特性)

以上の事項を調査するため、上記(1)~(5)について、長さの短いテストピースを用いた“吊揚索単体特性試験”，(6)および(7)として実機と同じ長さの索を用いた“吊揚索総合特性試験”を行った。

なお、今回の試験を実施するに当たり、“潜水調査船開発研究会”の委員各位、ならびに運輸省船舶技術研究所海洋開発工学部上野勲部長の適切なご指導、ご助言に対して、深く謝意を表する次第である。

2. 吊揚索単体特性試験

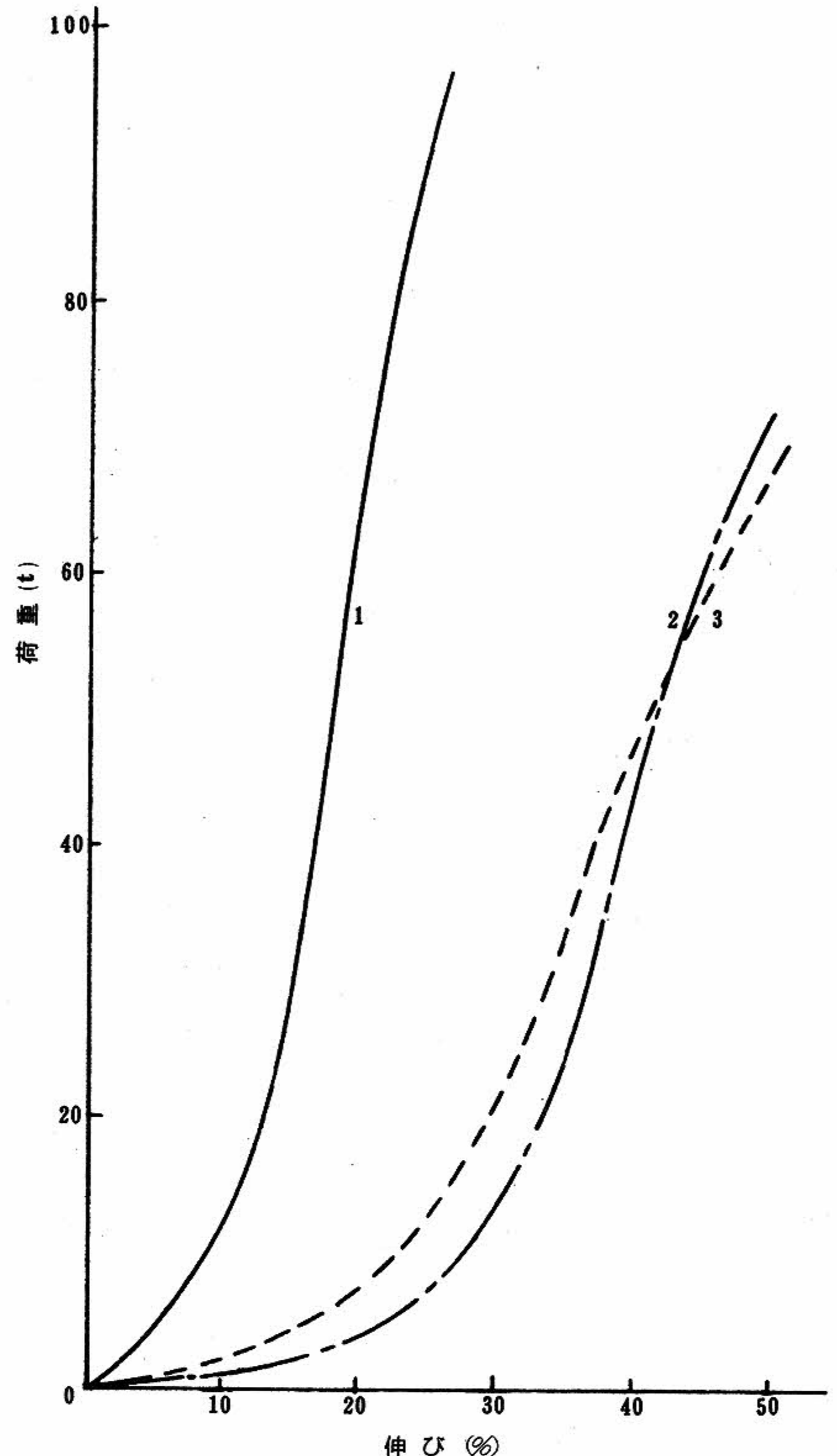
2.1 試験要領

2.1.1 引張試験

径100mmφ、40mmφ、30mmφの索について、1,000tおよび200tの模型引張試験機を用い、それぞれの索のカタログ破断荷重の1/60~1/6の負荷を3回繰返して与えたのち、破断するまで負荷を加え、予定破断荷重をクリアすることおよび荷重と伸びの相関を調査した。

表1に示すテストピースそれぞれ3本について実施し、100mmφ索について、実際の使用条件が雨天時である場合または使用場所が海上であるため、索は常に湿気を帯びたものであることを想定し、一昼夜、真水に浸漬したテストピースを含め、“乾”状態と“湿”状態との比較値を得た。

また、着水揚収装置の設計上の要求から索の端末部を極力小型化する目的で、100mmφ用ソケットを試作して試験した。なお、テストピースの長さは索の径の相違によって約2~3.7



- 1. テترون-ナイロン+タフレ索 (60mm φ), 97t, 26%
- 2. ナイロンエイト索 (60mm φ), 72t, 50%
- 3. ナイロン索 (60mm φ), 69.5t, 51%

図2 各種索の荷重-伸び曲線
Load-clongation curve for kinds of rope

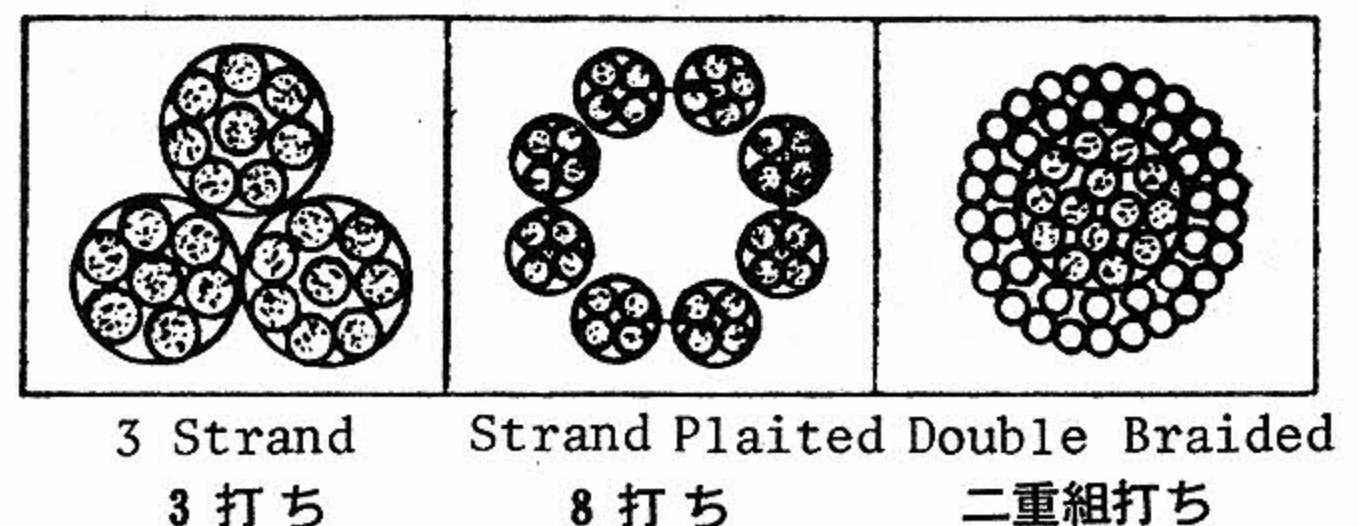


図3 合成繊維索断面(例)
The section of synthetic fiber rope (example)

mとした。

40mmφ索テストピースを写真1，1,000t横型引張試験機を写真2に示す。

2. 1. 2 衝撃試験

図4に示す衝撃試験機を用い，表2に示す30mmφおよび40mmφ索について，予定破断荷重に対して最大約1/6の負荷が加わるように衝撃を与え，このときの荷重と伸びの関係を求め，引張試験時の静的な荷重と伸び特性との相違を調べた。

負荷要領は索下端に受盤を吊し，上部から重錘を落下させ，索に衝撃力を加えた。またテストピース1本につき，3種類の衝撃力を徐々に大きくなるように与えた場合と，小さくなるように与えた場合の比較を行った。

表1 引張試験テストピース
Test pieces for vehicle

索 径 (mmφ)	端 末 部 形 状	乾湿 条件	テストピース 長さ(m)
φ 100	両端アイスプライス	乾	約 3.7
	両端アイスプライス	湿	約 3.7
	片端アイスプライス 片端ソケット	乾	約 3.2
40	両端アイスプライス	乾	約 2.0
30	両端アイスプライス	乾	約 1.6

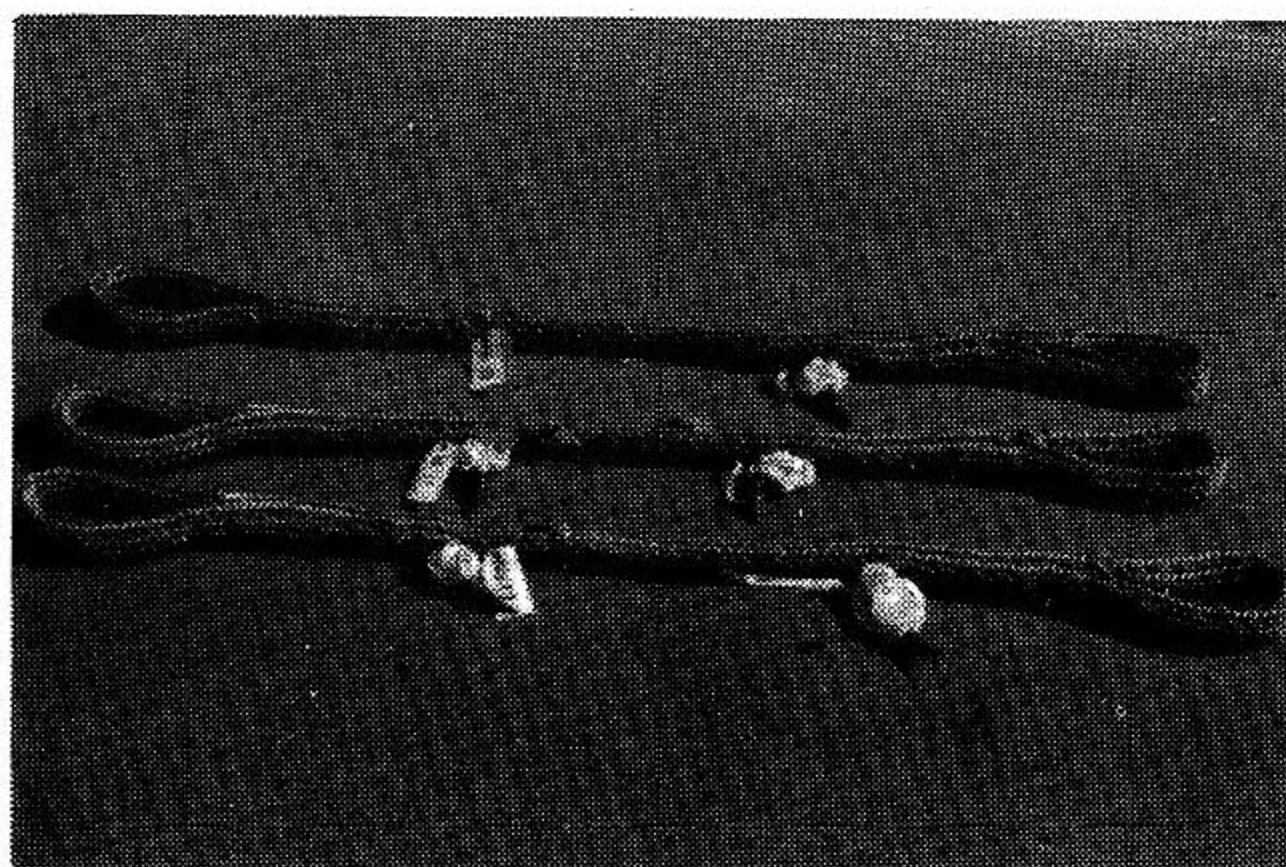


写真1 40mmφ索テストピース
(両端アイスプライス)
Test pieces of 40mmφ rope
(both ends are eye-spliced)

張力計測は，索上方につないだ張力計で行い，伸びは受盤両側に光源とホトランジスタを置き，重錘に取付けたスリットが光源をさえぎることによってスリット数を数え，伸びに換算した。なお，テストピースの長さは試験機の都合によって約2.5mとした。

2. 1. 3 疲労試験

40mmφ索について，索端末部形状を両端アイスプライス，両端アイスプライス—シンブル付，両端ソケットの3種のテストピースを製作し，50t 横型引張試験機を用い，索の予定破断荷重の1/60～1/6の変動負荷を表3に示すように，100～1,400回繰返し与えたのち，引張試験を行い，繰返し回数の相違および端末処理部形状の相違による強度低下を調べた。

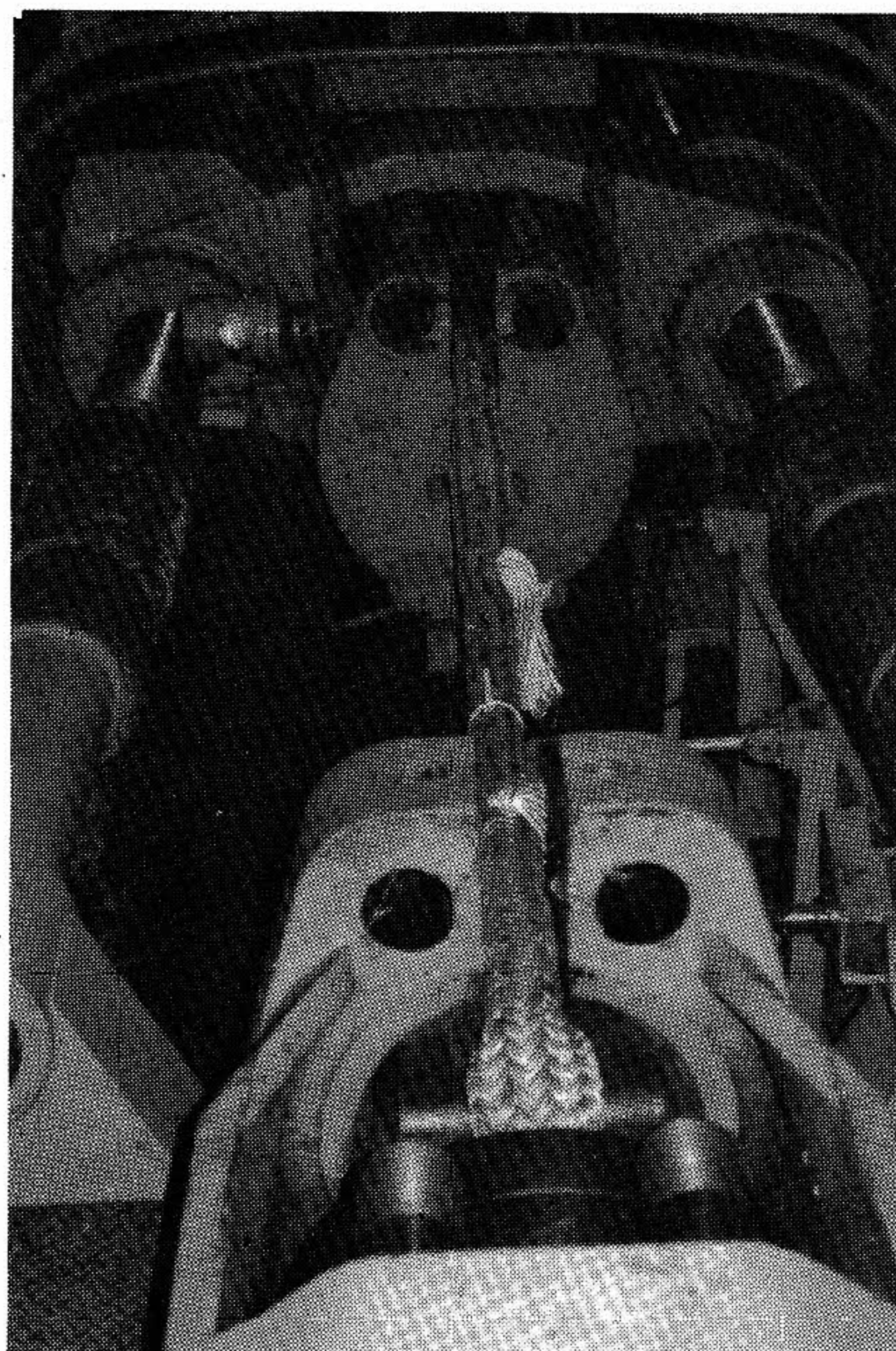


写真2 1000t 横型引張試験機
(100mmφ索引張試験中)
1000 ton horizontal type tensile test machine
(under the tensile test of 100mmφ rope)

変動負荷の繰返し回数は、潜水調査船の年間潜航回数を多い目の100回と想定すると着水揚収装置の使用回数は200回となるので、これを基に決定した。

2.2 試験結果および考察

2.2.1 引張試験

径100mmφ、40mmφおよび30mmφ（アイスブライス）の、いずれも、破断荷重は“乾”の状態の場合には、メーカー規格値をクリアし、満足できる結果を得た。

100mmφ“湿”の状態の破断荷重は、“乾”の状態に比べて若干落ちている。これはナイロン原糸の吸湿が原因である。またこの強度低下率はメーカー規格値の10%以内であり、索径選定に当っては常に“湿”状態を想定し、メーカー規格値の90%を実際使用する索の破断荷重とし、これに対して安全率を見込む必要があることがわかった。

100mmφソケット型索の破断荷重は、“乾”の状態でも、メーカー規格値の約73%と予想外に低い結果となった。また破断箇所はすべて、ソケット内部のエポキシ樹脂加工をした部分であり、樹脂加工をすることが索全体の強度低下に支配的となることが推察された。今後、改良が積み重なったとしても、短期間には鋼索のソケットで標準とされている保持率95%まで上げることは困難であろうと思われる。

また静的な索のばね定数は、今回の着水揚収装置の索の使用荷重範囲（索の予定破断荷重の約1/12～1/4）では、30mmφ索で約2t/m、40mmφ索で約3t/m、100mmφ索では約16t/mが得られた。

図5は索の荷重－伸び特性曲線比較図、写真3は100mmφ索の破断状況を示す。

2.2.2 衝撃試験

図6に示すように径40mmφ、30mmφ共に索の長短にかかわらず、いずれの場合も、衝撃力を小さいものから順次大きくした場合には、引張試験時の荷重－伸び特性にはほぼ類似しているが、荷重に対して若干伸びが少ない傾向にある。衝撃力を逆に、大きいものから小さいものへとした場合には、1回目の伸びがきわめて大きく、2回目、3回目の負荷時には、他のテストピースとはほぼ同様な荷重－伸び特性を示した。

表2 衝撃試験条件
Shock test condition

索 径 (mm)	30φ	40 φ			
索 長 さ (m)	約2.5	約 2.5			約1.8
乾 湿 条 件	乾	乾	乾	湿	乾
重 錘 落 差 順 序	小→大	小→大	大→小	小→大	小→大
予 定 破 断 荷 重 (t)	2.28	3.93			
衝撃荷重(t) (計算値)	1 回目	2.11	2.55	6.55	2.55
	2 回目	2.52	4.0	4.0	4.0
	3 回目	3.80	6.55	2.55	6.55
受 盤 重 量 (A)	0.635	1.1			
重 錘 重 量 (B)	0.635	1.1			

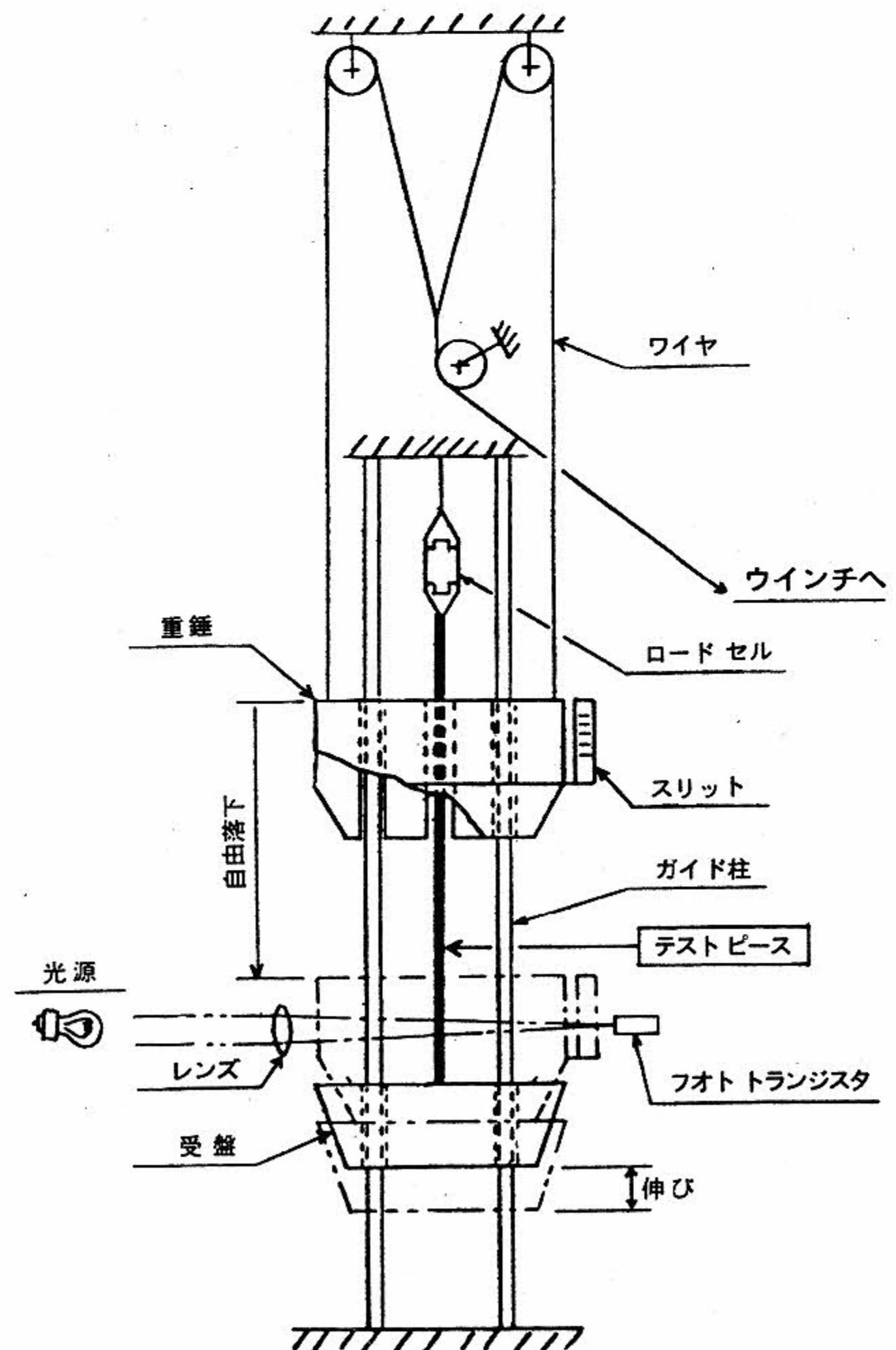


図4 衝撃試験機 原理図

Principal figure of shock test machine

2. 2. 3 疲労試験

図7に示すように、破断荷重はソケット型テストピースを除き、繰返し回数に関係なく、メーカー規格値をクリアし、今回の試験では顕著な疲労の傾向は現われず、アイスパライスのみとアイスパライス—シンブル付との差もわずかであった。疲労試験後の残留伸びは、シンブル付の方がわずかに多く残っている。これはアイ

スパイスとシンブル部での製作時のゆるみが伸び切ったものと考えられ、200回以降繰返したのち、ほぼ一定となり、特に問題とはならない。

ソケット型テストピースの破断荷重はメーカー規格値の82~95%であり、100mmφ索ソケットと同様、現状では強度的にかなりバラツキが多いことがわかった。

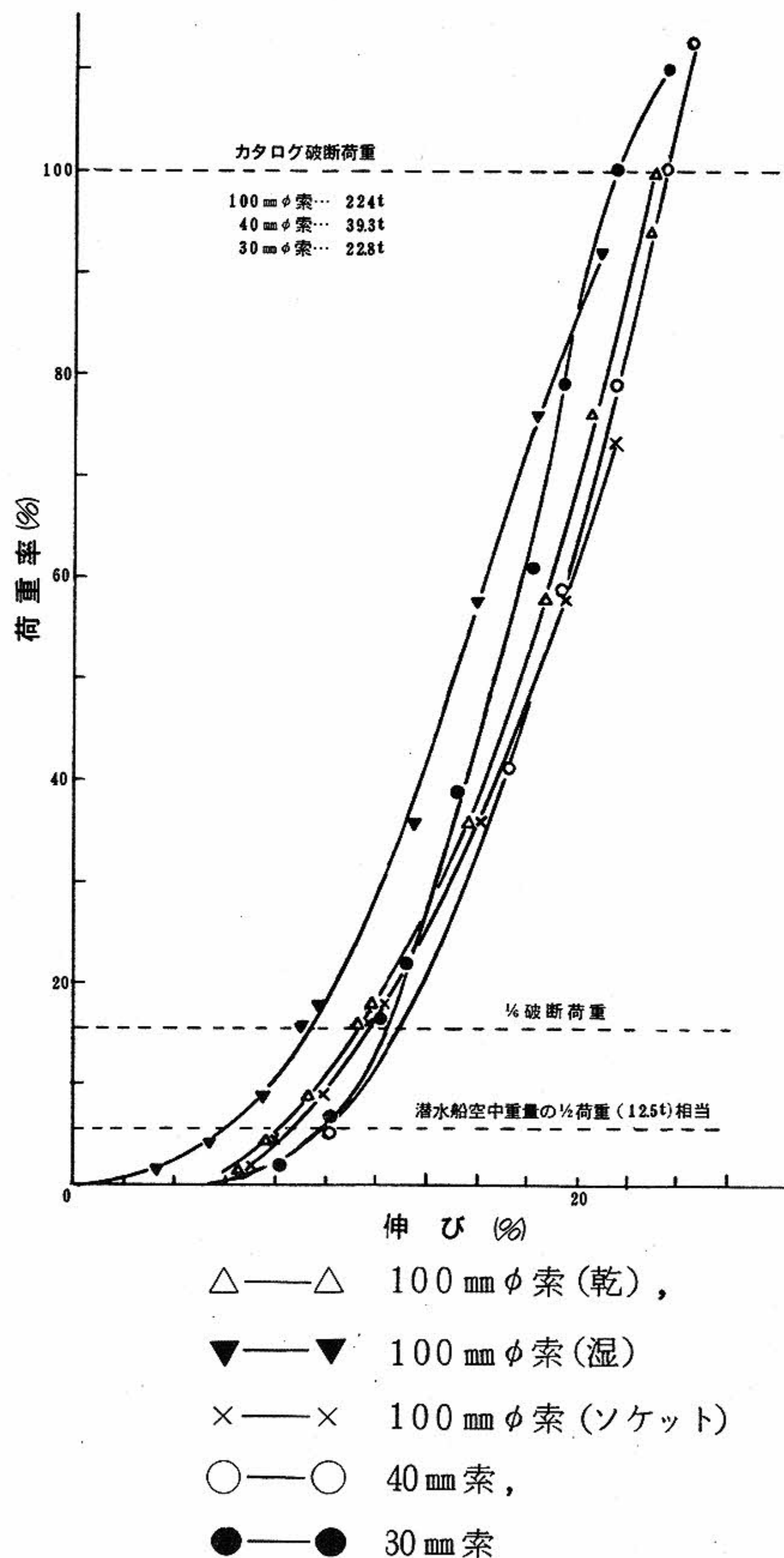


図5 テトロン・ナイロン

タフレ索の荷重—伸び曲線の比較

Comparative figure of tetron-nylon toughlay load-elongation curve

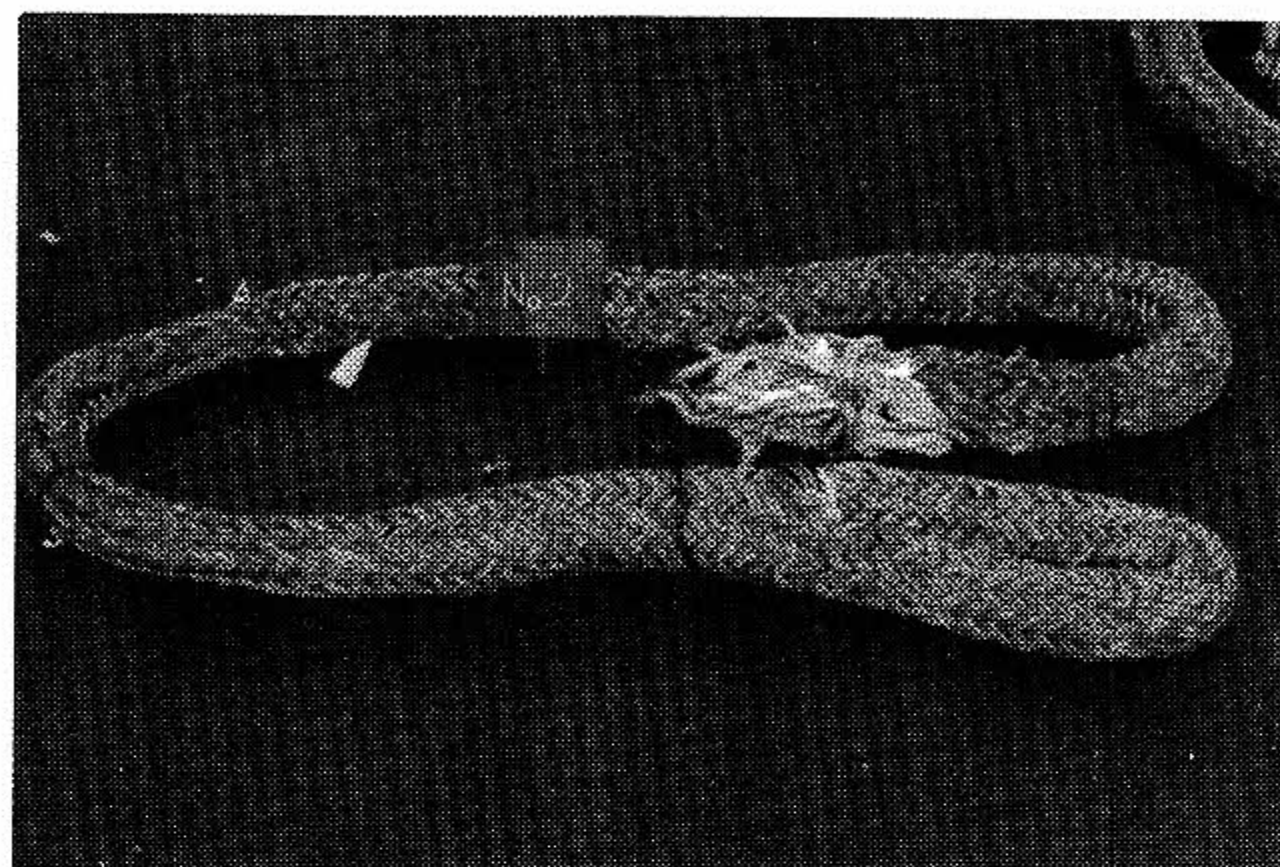


写真3 100mmφ索破断状況
100mmφ rope breaking situation

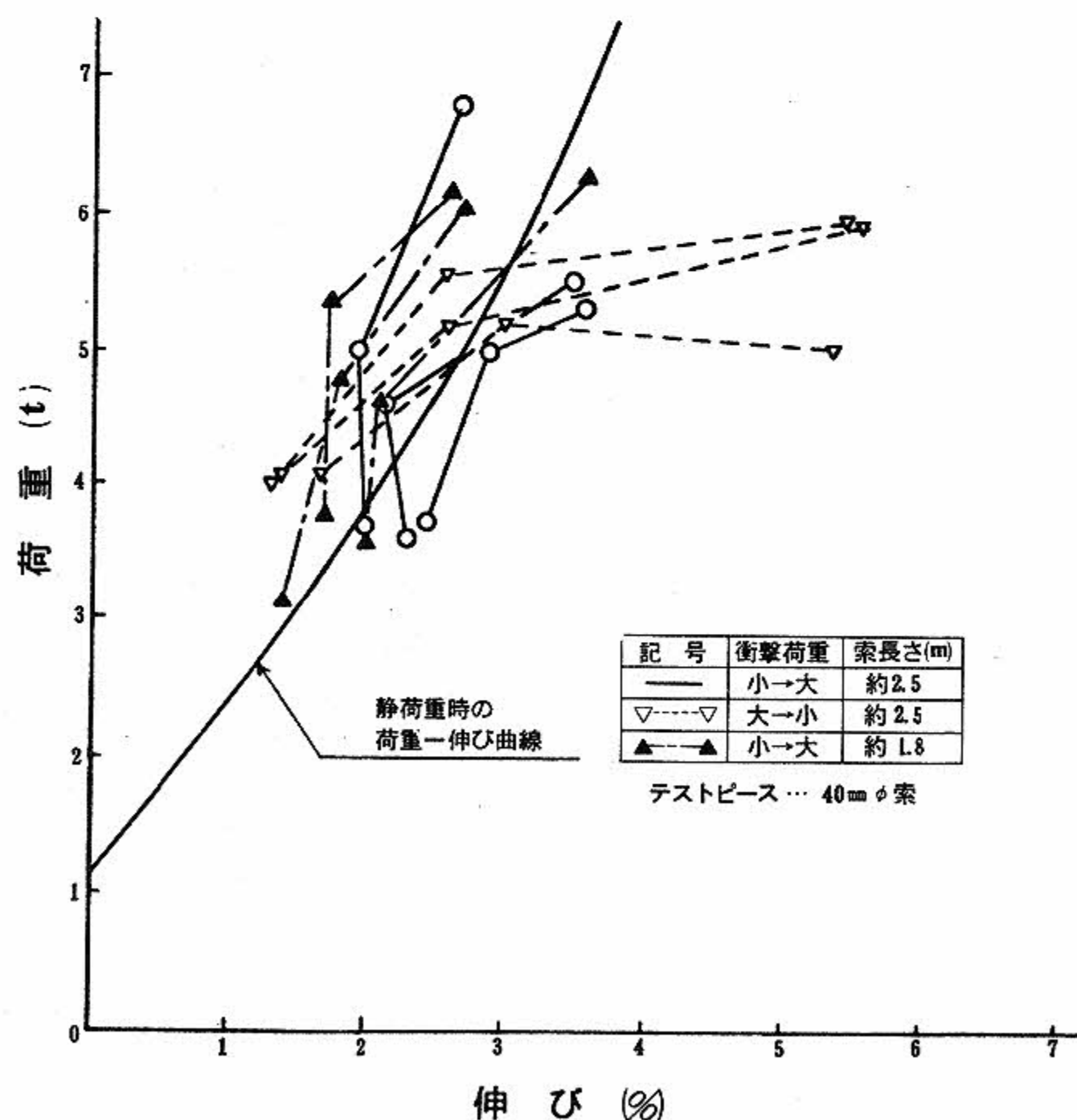


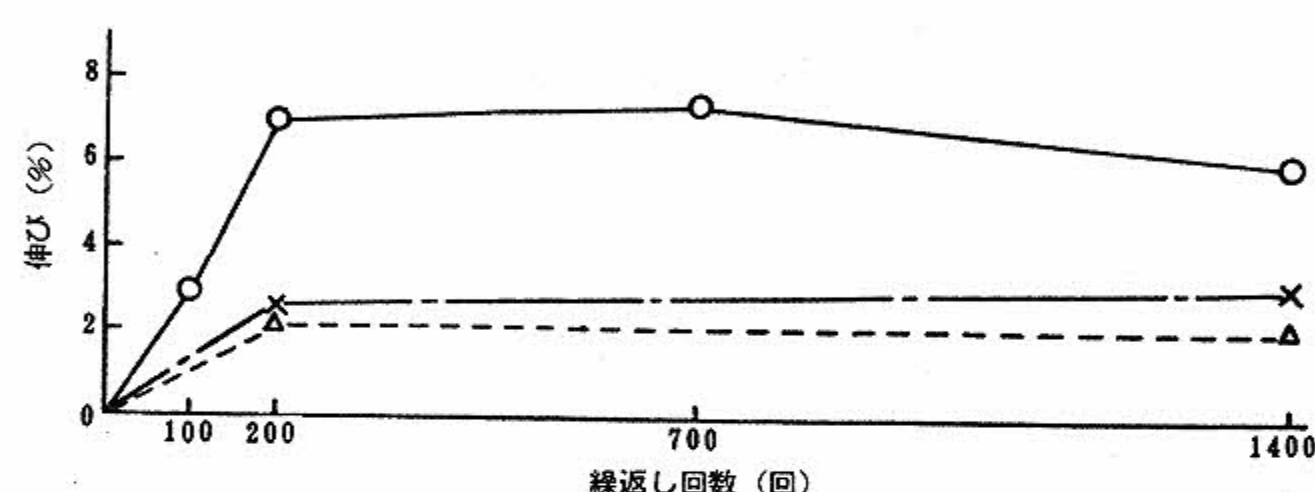
図6 衝撃試験時の荷重—伸び曲線

Load-elongation curve during shock test

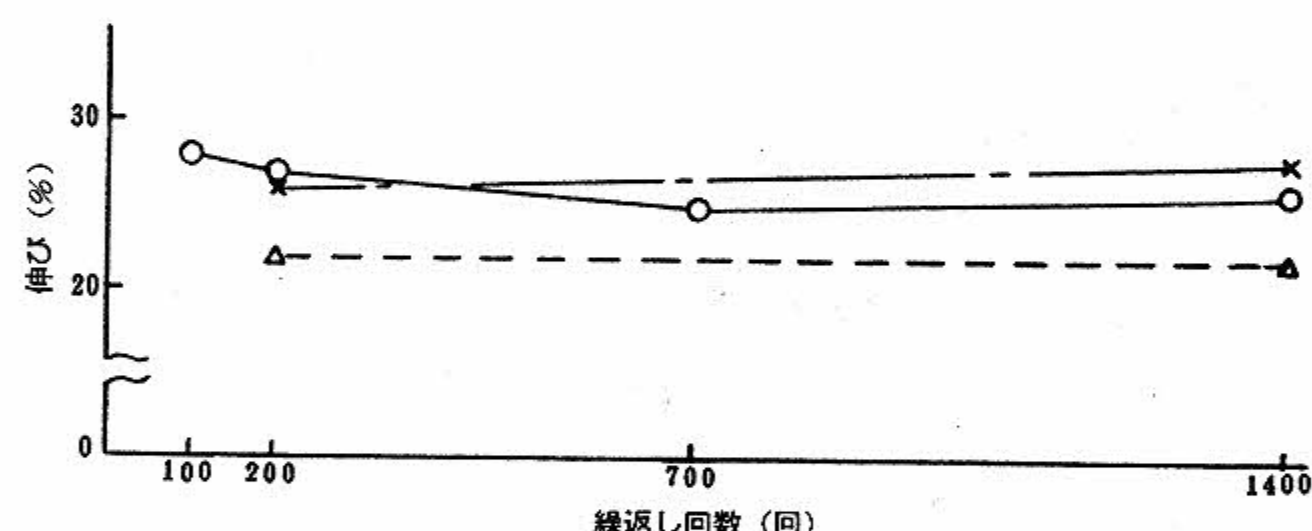
表3 疲労試験条件

Fatigue test condition

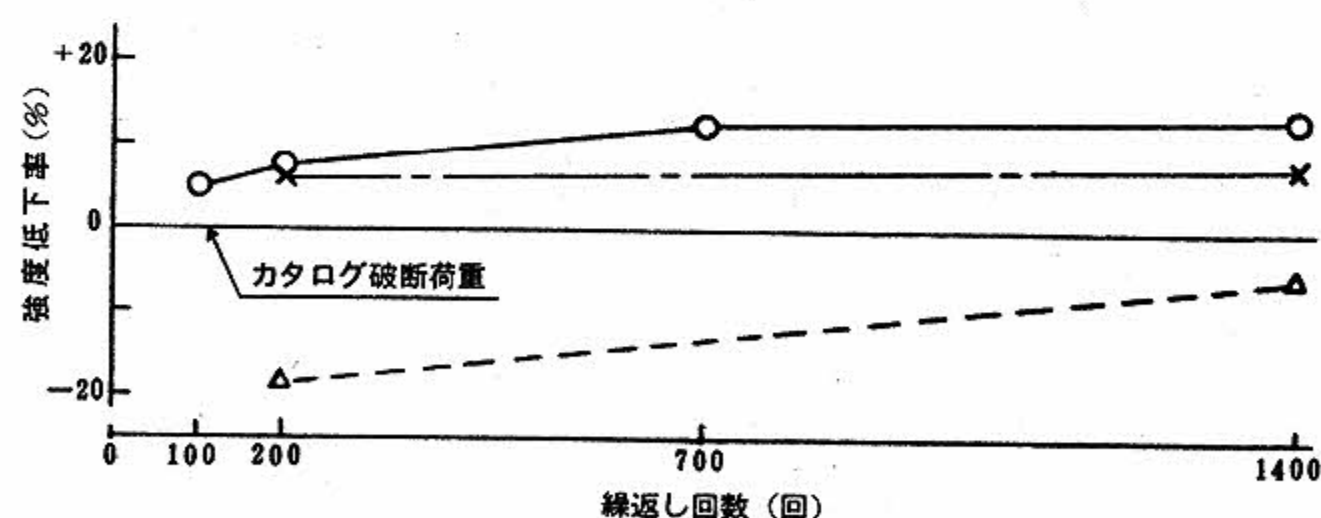
索 径	40 mm							
繰返荷重	0.65~6.5 t							
乾湿条件	乾							
索端末部 形 状	両端アイスパリス, シンプル付				両端アイス パリス		両端ソケット	
繰返回転	100	200	700	1400	200	1400	200	1400



(a) 疲労試験後の伸び



(b) 破断時の伸び



(c) 強度低下率

(c) 強度低下率

○アイ・シンプル, ×アイ, △ソケット

図7 疲労試験結果 (40mmφ 索)

Results of fatigue test (40mmφ rope)

試験結果,今回設定した年間着水揚収回数2,000回であれば,端末処理方法の相違による強度低下もほとんどなく,アイスパリスのみ(シンプルなし)の索で十分仕様を満足できる。

3. 吊揚索総合特性試験

3.1 試験装置および試験要領

3.1.1 試験装置

試験装置の概要を図8,試験装置全景を写真4に示す。

これはシーブ間の索長さが実機の着水揚収装置と同一装置で,9個のシーブの直径は実機シーブと同じく,索径の6倍とし,40mmφ 索用の240mmφ シーブを配置した。

索に強制動揺を与えるため,索の一端を固定し,他端に重錘を吊しておき,中間のシーブを動滑車として使用するため油圧シリンダーピストンロッドに連結し,油圧シリンダーピストンの運動はロータス型アキシャルプランジャポンプの吐出量を周波数発生器の電気信号(正弦波信号)でコントロールし,任意に振幅および周期が設定できるようにした。

本装置では重錘動揺振幅 ± 1.5 m (油圧シリンダー ストロークは0.75 m)で,周期6 s以上,重錘動揺振幅 ± 1.0 mで周期4 s以上の設定ができるようになっている。なお,重錘動揺振幅 ± 1.5 mはシーステイト3での母船動揺の1時間1回当たりの最大期待値に相当し, ± 1.0 mは同じく有義値に相当する。

索およびシーブの各所には,張力計および加速度計を取付け,索の変動張力および強制動揺(外力)を重錘動揺の位相遅れが計測できる。

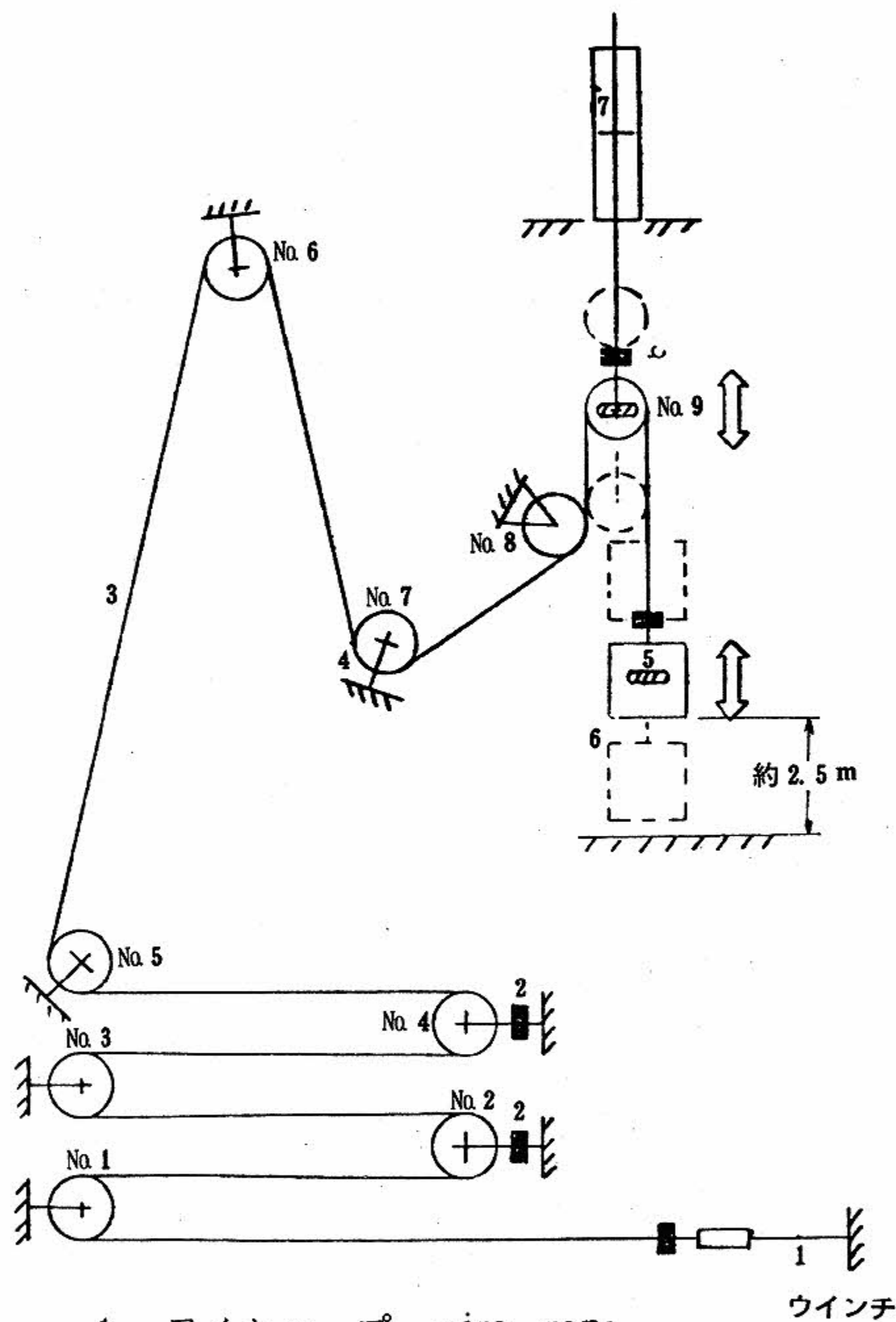
3.1.2 試験要領

図8に示す,試験装置にセットした索の先端に重錘を下げ,宙吊りにした状態で,油圧シリンダーピストンロッド先端のシーブが,潜水調査船吊揚時の実船における波浪中の母船運動を模擬した正弦波運動をするように,周波数発生器で油圧ポンプの吐出量をコントロールし,重錘に動揺を与えたときの索各部の張力変化,シーブ動揺と重錘動揺との位相差等の動的な応答特性を調査すると共に,シーブの摩擦抵抗を調べ,ウインチの力量設定の資料を得る。なお,索は径40mmφ,30mmφを使用し,索先端に吊す重錘重量は実機に使用する予定の85mmφ 索に加

わる応力〔吊揚索1本に加わる潜水船の空中重量（13.5 t/85mmφ索の断面積）と、40mmφ、30mmφ索に加わる応力が一致する重量とし、長さは実機と同じく55mとし、振動系モデルにおける実機と縮尺模型との相似則を満足するように設定した。

(1) 動揺試験；

図8に示すように、索の一端を固定し、他端に重錘を吊した状態で重錘に最も近いシーブを表4の条件で動揺させ、潜水調査



1. ワイヤロープ, wire rope
2. 張力計, load cell
3. 吊揚索, lift line
4. シーブ, sheave
5. 重錘, weight
6. 加速度計, accelerometer
7. 油圧シリンダー, hydraulic cylinder

図8 吊揚索総合特性試験装置の概念図

Schematic illustration of lift line characteristic test device

船を吊揚げ途中に空中で停止したときの母船の動揺状態を模擬し、索の張力変化、見掛け上のばね定数、強制動揺（外力）と重錘動揺の位相遅れ、シーブの摩擦抵抗を調査した。

(2) 吊揚試験；

母船が動揺中に潜水調査船を吊揚げる実船状態を模擬するため、第1の試験において固定した索端をウインチに接続し、表5の条件で重錘に動揺を与えた状態からウイ

表4 動揺試験条件
Forced dynamic test condition

索 径 (mm)	30 φ								
重錘重量 (t)	1.4, 1.68, 1.9								
動揺振幅 (m)	±1.5	± 1.0			±0.5				
動揺周期 (s)	6	4	5	6	7.5	9	6	7.5	9

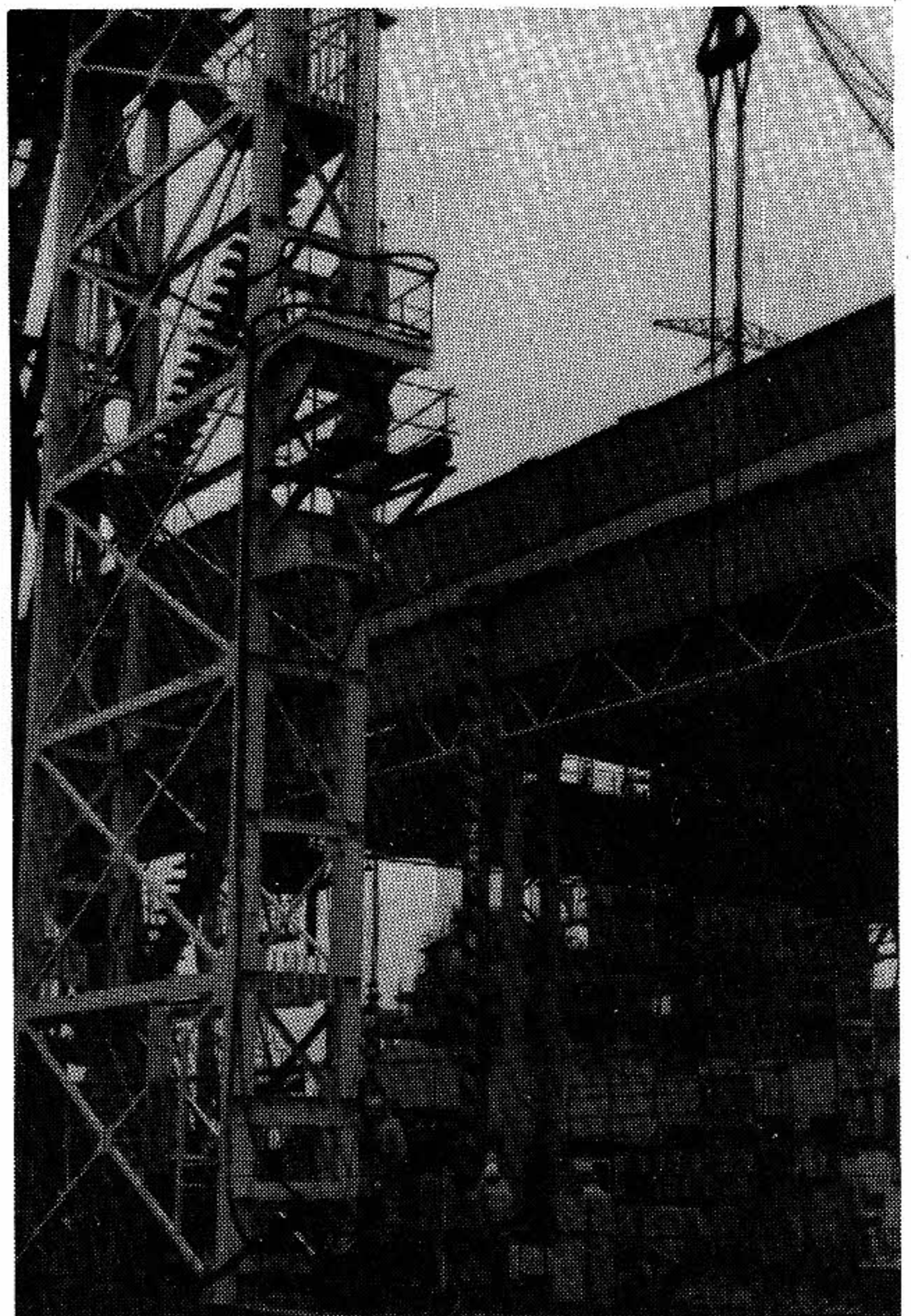
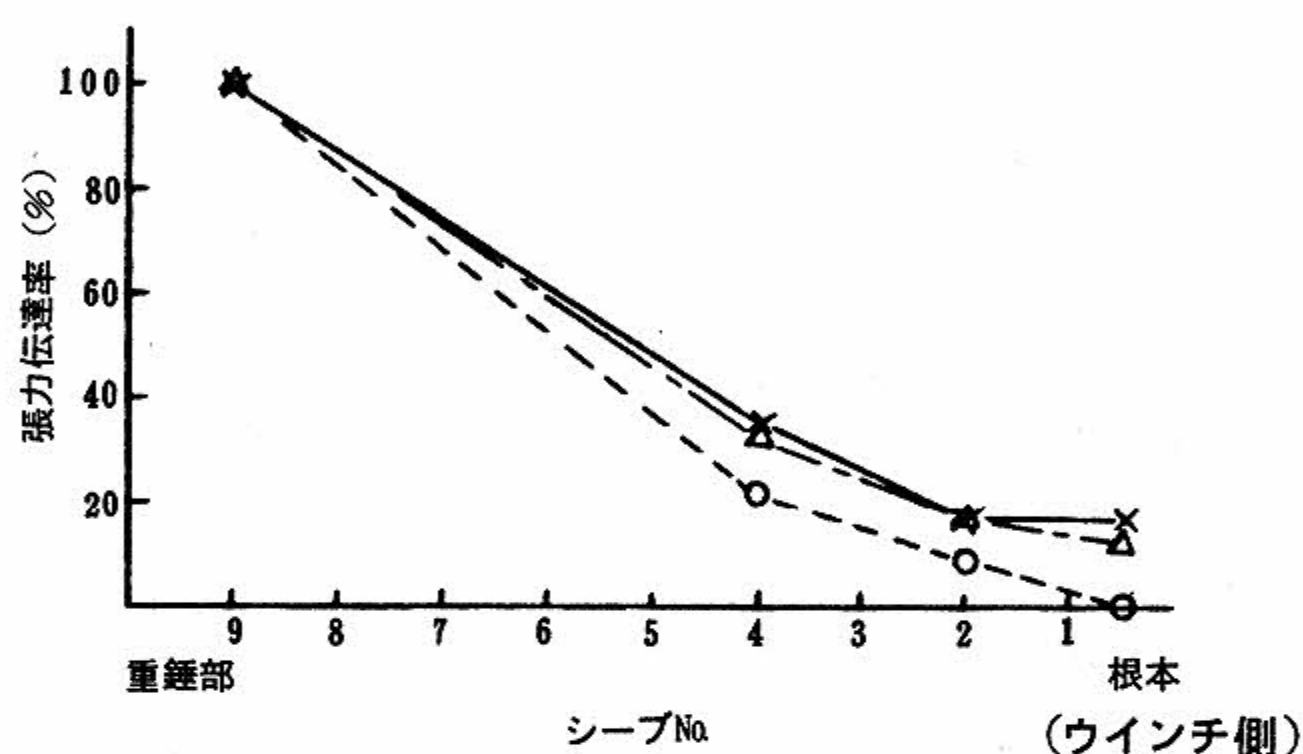


写真4 吊揚索総合特性試験装置 全景
View of lift line characteristic test device

表5 吊揚試験条件

Lifting test condition

索 径 (mm)	30 ϕ		
重錘重量 (t)	1.9		
動揺振幅 (m)	0	± 0.25	± 0.5
動揺周期 (s)	-	6	6
吊揚速度 (m/min)	約18		



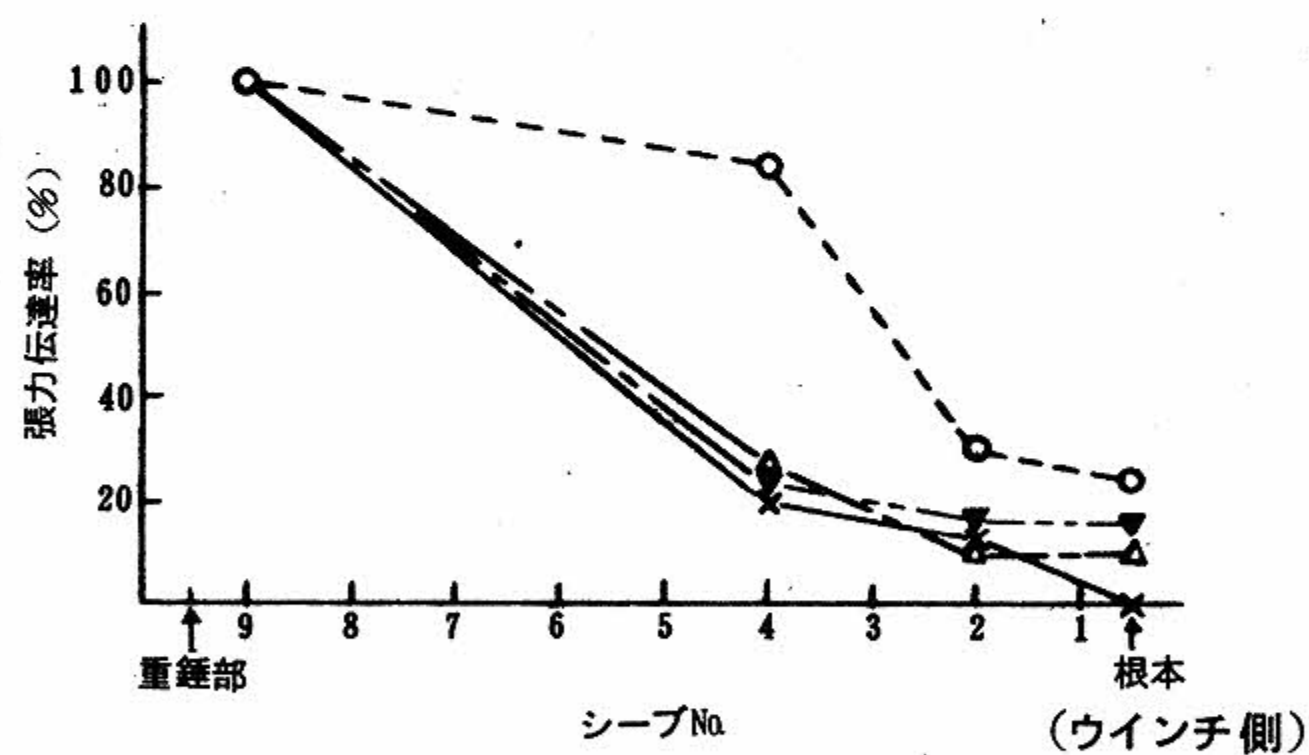
振幅；

○---○ ± 0.5 m, ×---× ± 1.0 m,
△---△ ± 1.5 m

索径；30mm ϕ ，重錘；1.68t，動揺周期；6s

図9 吊揚索の張力伝達率（動揺試験）

Tension conductivity of lift line
(simulated dynamic motion test)



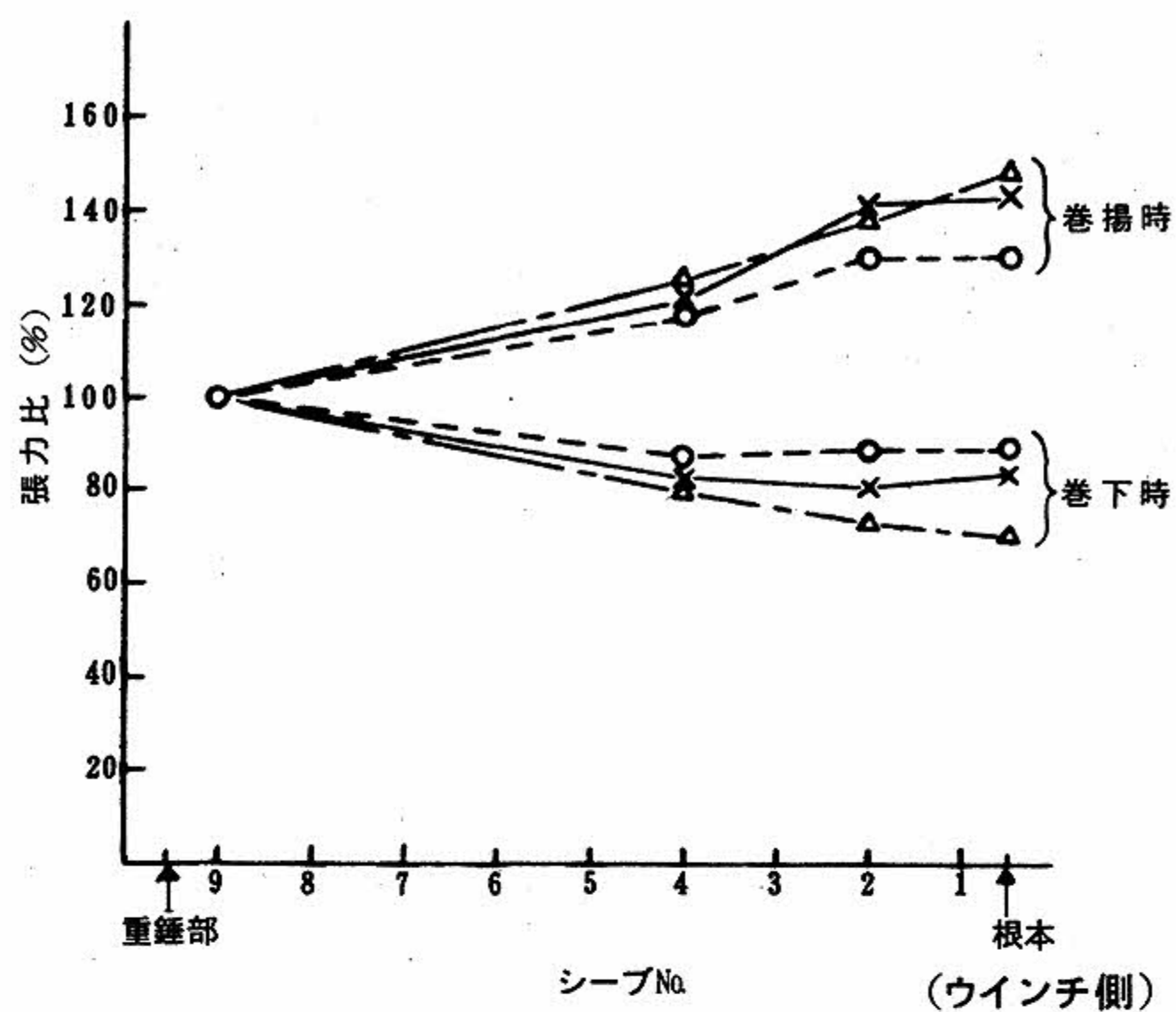
動揺周期；

○---○ 4s, △---△ 5s,
▼---▼ 6s, ×---× 9s

索径；30mm ϕ ，重錘；1.68t，振幅； ± 1.0 m

図10 吊揚索の張力伝達率（動揺試験）

Tension conductivity of lift line
(simulated dynamic motion test)



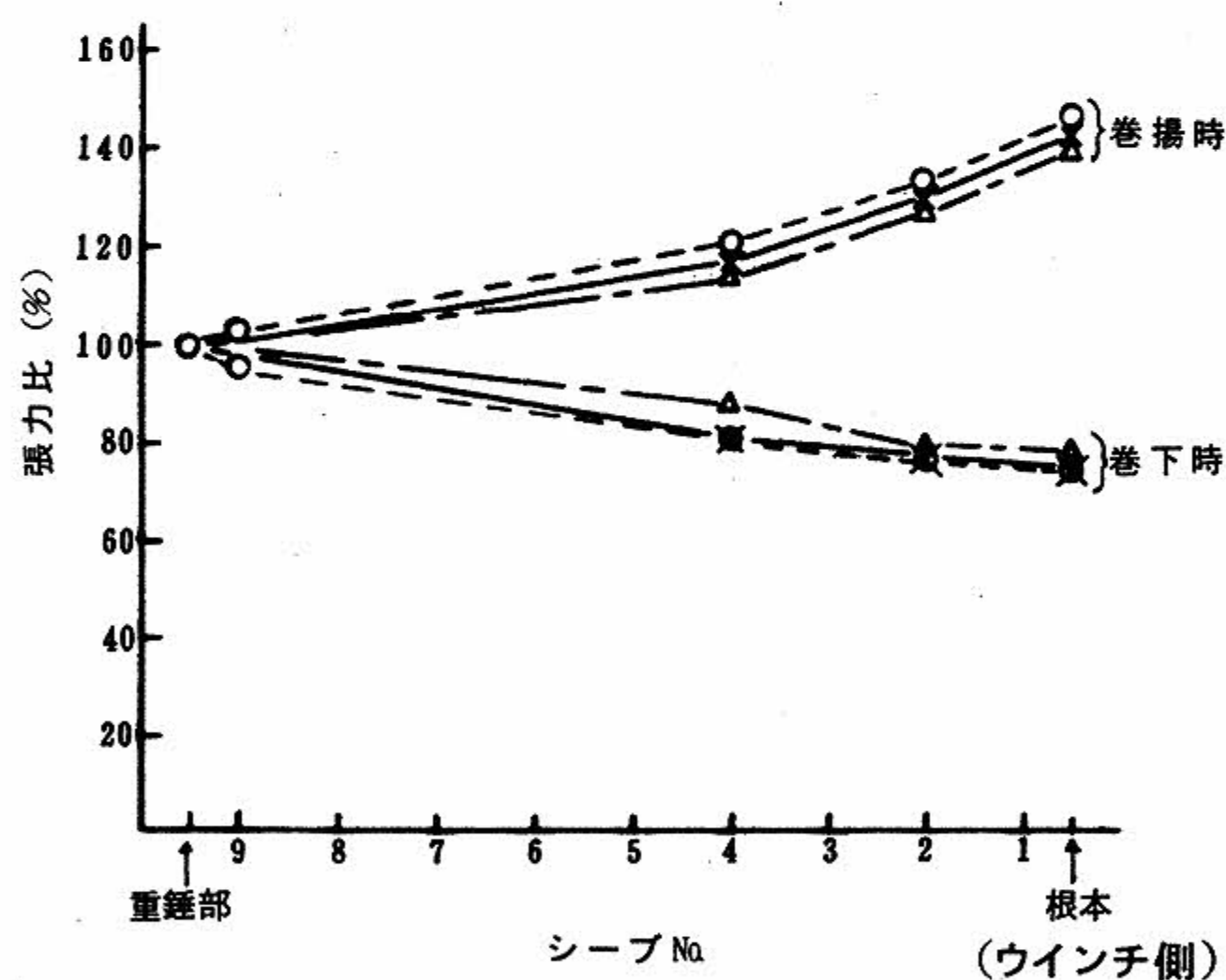
振幅；

○---○ ± 0 m, ×---× ± 0.5 m
△---△ ± 1.0 m

索径；30mm ϕ ，重錘；1.9t，
動揺周期；6s

図11 各シープ点での張力比較（吊揚試験）

Tension comparison at each sheave point
(simulated lifting test)



振幅；

○---○ ± 0 m, ×---× ± 0.25 m,
△---△ ± 0.5 m

索径；30mm ϕ ，重錘；1.9t，動揺周期；6s

図12 各シープ点での張力比較（吊揚試験）

Tension comparison at each sheave point
(simulated lifting test)

ンチで重錘を巻上げ、総合的な張力変化および見掛け上のばね定数を調査した。

3. 1. 3 試験結果および考察

潜水調査船を吊揚途中に吊揚を停止した状態で、母船で強制動揺させられる場合を模擬した動揺試験の結果、索に発生する張力変化は振幅一定で周期を変えた場合も、周期一定で振幅を変えた場合も、同じ傾向を示し、図9および図10に示すように、シーブの数にはほぼ比例して減衰し、索の根本まではほとんど伝っていない。

このようにシーブの抵抗等による減衰が著しい結果、索先端の荷動変動による索の伸び縮みが索全長の内の一部分にしか生じず、30mmφ索では見掛け上のばね定数が約6 t/mとなり、静的なばね定数のほぼ3倍に達し、硬いばねとなることが分った。これを実機に使用予定の85mmφ索に換算すると、約36 t/mとなる。

これに対し、ほぼ実船での使用状態を模擬した重錘に動揺を与えながら、ウインチで索を巻上げまたは巻下す吊揚試験の結果を見ると、図11に示すように、巻上げ時と巻下げ時とでは減衰傾向は全く逆となり、索全長にわたり平均して弾性変化を生じるようになることがわかる。この結果、索の見掛け上のばね定数は約3 t/mとなり、前述のばね定数6 t/mに比べ、軟かいばねとなり、静的なばね定数の約1.5倍に近づいて行く。これを85mmφ索に換算すると、約18 t/mとなる。また、このときの索の根本（ウインチ側）の張力は図12に示すように、重錘重量の約45%増となり、実機換算では約20 tとなる。またシーブの抵抗による吊揚張力の増加は、シーブの慣性によるものはほとんどなく、摩擦

抵抗のみであり、図11からわかるように、約25%増である。この結果、ウインチの力量は19.7 t以上とすればよい。

索の固有振動数を調査した結果、母船動揺の振動数との比(w/p)はシーステイト4の場合でも0.6以下となり、共振現象($w/p = 1$ のとき共振)を起すことはなく、外力と重錘動揺との位相遅れもほとんど見られなかった。

4. ま と め

- (1) アイスプライス加工をした大直径を持つ索であっても、破断荷重はメーカー規格値で十分に信頼できる。
- (2) “湿”の状態での索の破断荷重は、メーカー規格値の約90%と考えておくことが必要である。
- (3) 索の疲労強度はアイスプライス加工をしたものでは、シングルの有無にはあまり影響がなく、本システムでは端末部はアイスプライスで十分である。
- (4) 変動負荷に対する索のばね定数の変化は、静的なばね定数（索の破断荷重の約1/12～1/4付近におけるばね定数）の約1.5倍である。
- (5) 動揺による索の張力増加は約45%であり、ウインチ力量はこれを満足するように設定すればよい。
- (6) 本システムでは強制動揺による共振現象、位相遅れはない。

以上のことが本試験によって確認され、本外層テトロン-内層ナイロン 二重組打索（商品名：テトロン-ナイロン-タフレ）が、実船に使用できることがわかった。