

## 化学繊維ロープの疲労破壊試験について

高木儀昌\*・森口朗彦\*・大山寿美\*・渡部俊広\*\*・  
山崎慎太郎\*\*・首藤洋一\*\*\*・市川正和\*\*\*

### Title: Destructive Fatigue Test of Chemical Fiber Ropes

Norimasa TAKAGI\*, Akihiko MORIGUCHI\*, Hisami OYAMA\*, Toshihiro WATANABE\*\*,  
Shintaro YAMASAKI\*\*, Youichi SYUTO\*\*\*, and Masakazu ICHIKAWA\*\*\*

**Abstract:** Chemical fiber ropes have been used for mooring floating bodies in deep sea regions. However, they are used without knowledge of their resistance to repeated load exerted by waves. In this study, for the purpose of using light, low-cost chemical fiber ropes for mooring, an experiment was carried out to test their resistance to repeated load waves bring upon them, which is not clearly understood.

This paper gives the outline of a fatigue test of chemical fiber ropes using the largest rope tension tester in Japan at National Institute of Fisheries Engineering. The test result of Tetron ropes 10 mm in diameter is used to make a proposal for rope fatigue test methods, which have not necessarily been firmly established.

#### 1. はじめに

近年、大水深域の大型浮体式構造物の係留索として、化学繊維ロープが使用されてきている。理由は、従来から使用されてきている鋼製のチェーンやワイヤーロープの係留索に比べて、軽量であること、軽量であるが故に、設置・回収に掛かる機材が軽微で、工事期間が短期間で済み、全体として係留に関する費用が圧縮できることが上げられる。このような特徴は、一般に水深の3倍から6倍の係留索長が必要とされる係留システムにおいて、設置水深が深くなればなるほど、係留システムに掛かる費用負担を大きく軽減できる可能性を示している。水産の現状では、浮魚礁のような大水深に設置する施設において、係留索重量の軽減及び、浮力体の小型化のため、化学繊維ロープが使用されているのみであるが、海洋開発が沖合・大水深域に進むにしたがって、前述のような理由により使用頻度が増加することが予測される。

化学繊維ロープを、長期間沖合の波浪条件の厳しい海域で係留索として使用する上での問題点として、チェーンやワイヤーロープと同等の安全性の確保が上げられる。特に、化学繊維ロープに関しては、波浪による繰り返しの荷重に対する強度低下や破壊のメカニズムに不明な点が多く、この点を解明することが、安全性確保にとっての課題となっている。

本研究は、化学繊維ロープの疲労破壊に至るまでの過程を明らかにし、最終的には大水深域における大型浮体式構造物の係留システムに化学繊維ロープを利用した場合の設計法の確立を目的として開始された。

本論では、現状として確立されているとは言い難い、化学繊維ロープの疲労試験法について、実験結果をもとに試案を示し、試験体の事前の準備、繰り返し荷重の設定などについて若干の考察を行う。

#### 2. ロープ引張り試験機の概要

今回使用した試験機は、水産工学研究所の漁業資材

物性棟に設置されているもので、Photo. 1 に示したように横置き型で、長さ3mまでの試験体に300 kNの引張り荷重を作用させることができるものである。この試験機は、浮魚礁の係留索などの長尺のロープ試験に使用するために開発された機種で、1m程度のロープの伸びを許容し、一定載荷荷重のもとで繰り返し試験が可能である。

本試験機の疲労試験を実施する上での問題点は、長尺のロープを一定荷重条件で繰り返すため、1サイクル当たりの載荷時間として4分から2分を必要とすることである。この載荷時間から換算すると、1日当たり360回～720回、1ヶ月当たり10,800回～21,600回、1年当たり約13万回～約26万回となり、一般に数万回から数百万回の載荷回数を必要とする疲労試験においては、時間が掛かり過ぎることが問題と言って良い。

一般に疲労試験は、短期間で載荷回数を稼ぐため、1サイクル当たりの周期が1秒以下の短周期で実施されている。これに対して、本実験では4分から2分という長周期で、なおかつ荷重を制御しながら、一定荷重を維持する方式であるため、試験体の伸びや縮みの影響を考慮できる試験である。

したがって、本試験機を効率良く稼働する中で、化学繊維ロープの疲労特性を把握できれば、厳密な意味での性能を評価できることになる。



Photo. 1 引張り試験機外観

### 3. 試験ロープの概要

試験に使用したロープは、テトロンSタフレロープ（一般名称：ポリエステル二重組み打ち索）で、材質はポリエステルで、構造は芯と外層の二重構造である。



Photo. 2 引張り試験機制御装置

特徴は、非自転構造で、高強力、高耐久性で、水の影響を受けにくいことが上げられる。融点は、238 で、比重は1.38である。

末端処理方法は、スプライスソケット加工（樹脂ソケット、コッタ方式）である。

## 4. 繰り返し荷重試験

### 4.1 試験準備

#### 1) 試験体

今回試験に使用した試験体は、テトロンSタフレロープの10mm径3本である。破断荷重は、36kNである。それぞれの試験体は試験機のつかみ具に取り付けるため、端部を楕円状に加工（一般にアイ加工と言われる）した（参照、Photo. 3）。この加工の善し悪しによって、本来ロープが持つ強度が、実験上では大きく変化することが知られており、浮魚礁の設計指針などでは1割の強度低下を見込んでいる。これは、ロープ本体に端部を差し込み加工する際、技術者の技量による差が現れるためである。

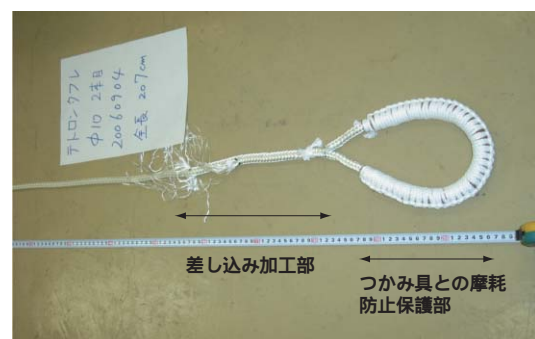


Photo. 3 アイ加工部外観

そこで本実験で使用する試験体は、東京製網繊維ロープ（株）の熟練技術者によってアイ加工されたものを使用した。

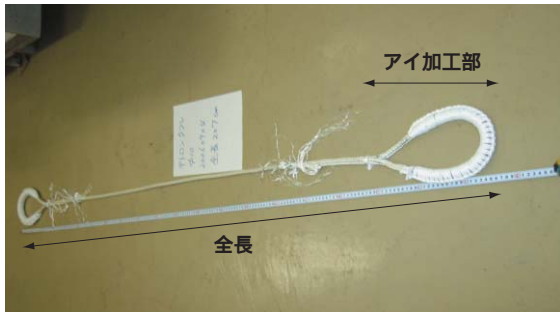


Photo. 4 試験体の計測



Photo. 5 試験体の取り付け状況  
( 20の場合)

また、アイ加工した部分はずかみ具との間で摩耗し、その結果として破断する可能性があるため、網地を巻いた上に5mm径のロープで保護加工を施した（参照Photo. 3）。

2) 試験体の計測及び取り付け

試験体は、力を加えない状態で全長を測定したあと（参照Photo. 4）、試験機のつかみ具にセットし（参照Photo. 5）、0.5kNまで荷重を掛け、ロープの伸びが一定になったところで、アイ部付け根間のロープ長を測定した。

3本の試験体の全長、又長（アイ部の付け根から付け根までの長さ）、及び調整後の又長をTable 1に示した。結果から、3本の試験体の全長は206cmから207cmで、又長は163cmから164.5cmであった。調整後の又長は169cmから171cmで、調整した結果6cmから7.5cmの伸びが各試験体に発生し、その割合は全長に対して2.9%から3.6%であった。

3) ロープ弛みの調整

試験体を試験機にセットしただけでは、ロープ自体に弛みがあり、弾性範囲内で同一荷重での繰返し試験を実施することができないため、この弛みを取る必要がある。

今回の試験では、破断強度（36kN）の44%（16kN）程度の負荷を与え、0.5kNになった時点で零点を取り直し、これを繰返し実施することで、零点位置が一定になったところで調整を終了した。なお、並行して実施している20mm径ロープの試験において、破断強度50%の繰返し試験を計画しているため、破断強度の45%で弛みの調整を行っていることから、本試験においても比較のために同等の負荷を用いた。なお、弛み

Table 1 試験体の測定及び調整の結果

	試験体 1			試験体 2			試験体 3		
材質・径	テトロンSタフレ・10			テトロンSタフレ・10			テトロンSタフレ・10		
全長	207cm			207cm			206cm		
初期又長	163cm			164.5cm			163cm		
弛みの調整	0.5kN - 16kN - 0.5kN			0.5kN - 16kN - 0.5kN			0.5kN - 16kN - 0.5kN		
1回目 mm	0	181.7	67.6	0	189.4	73.1	0	190.2	73.9
2回目	0	116.2	8.0	0	116.8	8.7	0	120.2	8.5
3回目	0	110.8	0	0	110.5	0	0	112.2	0
4回目	0	112.2	0	0	112.6	0	0	112.7	0
5回目	0	113.0	0	0	111.4	0	0	112.4	0
3～5回目の 平均値	112mm			111.5mm			112.4mm		
残留変位の合計	75.6mm			81.8mm			82.4mm		
調整後の又長	169cm			171cm			170.5cm		

の調整については、経験的に50%以下が用いられているだけで、ロープの種類や疲労試験の内容によって、修正されていくものと考えている。

結果は、Table 1のとおりで、3本とも2回までは、最大荷重を掛けたあと0.5kNにもどしても、変位はもとに戻らず、零点の修正をしたが、3回目以降は零に戻った。残留変位の量は、1回目67.6mmから73.9mm、2回目8.0mmから8.7mmで、合計75.6mmから82.4mm、全長に対する割合は3.7%から4.0%であった。また、16kNに対する変位量の平均（3回目から5回目まで）は、111.5mmから112.4mmであった。

#### 4.2 繰返し引張り試験

試験準備の結果から、手作業により製作されたる試験体ではあるが、3本はほぼ同等の品質と判断して実験に使用した。

試験は、試験機の機能の中に、9,999回までの繰返し機能があり、今回はこの機能を利用して、最大引張り荷重が一定になるような制御をして実施した。

なお、試験は、弛みの調整段階から、試験体上部に設置したパイプから試験体全体が湿潤状態となるように、水を流しながら実施した。

データとして、1秒毎に試験体の変位量（伸び・縮みの量）と荷重を記録した。

実験に用いた荷重振幅は、マリノフォーラム21（1992）に示された資料から、1,000回から10,000回程度（数日から2週間程度）で実験が終了する、破断強度の70%から50%の範囲で設定した。具体的には、Table 2に示す3ケースを設定した。

Table 2 実験ケース

	最小荷重	最大荷重	破断強度に対する割合
実験ケース 試験体1)	3kN	27kN	67% $((27-3)/36 \times 100)$
実験ケース 試験体2)	3kN	25kN	61% $((25-3)/36 \times 100)$
実験ケース 試験体3)	3kN	23kN	56% $((23-3)/26 \times 100)$

ここで、最小荷重は破断荷重の10%以下で設定した

### 5 . 実験結果及び考察

#### 5.1 破断までの回数

各実験ケースにおける破断までの回数は、以下のとおりである。

実験ケース1 : 13回

実験ケース2 : 15回

実験ケース3 : 3,165回

マリノフォーラム21（1992）によると、実験ケース1の場合約300回、実験ケース2の場合約600回、実験ケース3の場合約2,000回程度が破断回数として予測される回数であったが、実験結果は実験ケース3の場合のみ類似した結果となったが、実験ケース1及び2については想定に比べてかなり少ない回数で破断に至った。破断箇所は、すべてアイ加工を施した直下であった。（参照. Photo. 6～9）



Photo. 6 試験体の破断状況  
(20の場合)



Photo. 7 実験ケース1の破断状況



Photo. 8 実験ケース2の破断状況



Photo. 9 実験ケースの破断状況

原因として考えられることは、アイ加工の不具合によるロープを構成する糸に発生する不均一な応力、マリノフォーラム21(1992)との疲労試験法の相違、実験結果の解析法の相違(多くのデータの平均値)、高荷重の繰返し試験のために発生した、結果の不安定性、などである。

については、試験準備の結果からも明らかなように、3本の試験体の品質に大きな差異は認められないため、原因とは考え難い。については、マリノフォーラム21(1992)に疲労試験の詳細が示されていないため、確認できない。しかし、S Banfieldほか(2001)に示されている多くの実験ケースでは、1サイクル当たり数秒以下で、一定変位での試験である。したがって、本試験のような、2分から3分の長周期で載荷荷重を一定に制御したものと、結果に差異が

生じる可能性がある。については、既存資料が平均値であるとして、実験結果もその中の1データとすると、300回、600回の平均値になるためには、1,000回を超えるような結果も存在するという事となる。したがって、原因としては、に上げた試験法の違いと、に上げた不安定な結果となる荷重範囲であったことが推察される。

### 5.2 破断までの変位の変化

Fig. 1に、0.5kN時を零としたときの、各実験ケースにおける回数毎の、最大荷重時及び最小荷重時の伸びの量の変化を示した。また、Fig. 2に各実験ケースにおける回数毎の、一定載荷荷重に対する伸びの変化量(最大荷重時の伸びと最小荷重時の伸びの差)を示した。

Fig. 1の結果から、最大荷重時及び最小荷重時の試験体の伸び量は繰返し数が増加するに従って増加しており、特に10回程度までが増加割合が大きいことが判る。実験ケース1及び2については、この流れの中で伸び限界を超えたことで、破断に至ったと考えられる。これに対して、実験ケース3の場合は、載荷荷重が低かったことで、限界まで達しなかったため、10数回以降微小な伸びを継続し、3,165回で破断に至った。

実験ケース1から3における、最大荷重時の伸びを比較すると、実験ケース3は、実験ケース1の約20cmには達しないが、実験ケース2の約18cmと同等の量で破断している。これに対して、最小荷重時の伸びは、実験ケース1及び2を実験ケース3は超えており、破断の条件は一義的には最大荷重時の伸びによって、決定されているものと推察された。

Fig. 2の結果から、載荷荷重一定のもとでの、実験ケース1から3に関する毎回の伸び量は、徐々に小さくなることが判る。これは、ロープ全体としては伸びるものの、荷重の変化に対する柔軟性が劣化すること

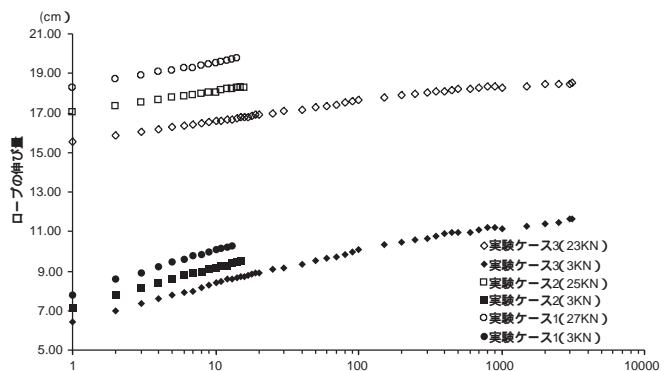


Fig. 1 各実験ケースにおける最大・最小時の伸び量

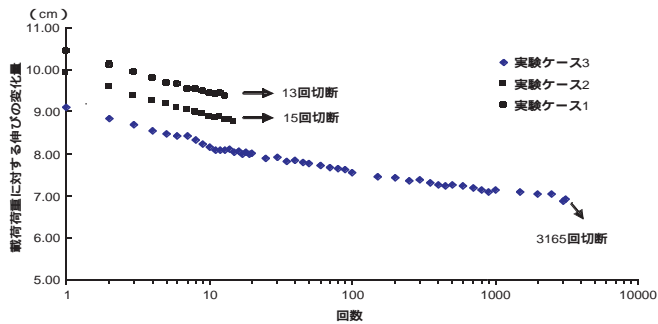


Fig. 2 各実験ケースにおける載荷荷重に対する伸びの変化

を示しており、言い換えれば高荷重によってロープが絞られることで徐々に固まり、もとに戻り難くなることを示している。

以上の結果から、次のような仮説を得ることができた。

一般に鋼材の引張り試験を実施したとき、始めに弾性体としての特徴を示し（弾性域）、降伏点を境に塑性域を経て、破壊に至る。ロープには、明確に弾性域や塑性域なる領域は示されていないが、破断に至るまでには、弾性域から塑性域を経ることは想像できる。仮に、今回の実験結果をこの現象に当てはめて考察すると、実験ケース1及び2に作用させた荷重は、試験体を塑性域にまで至らせる荷重であったとすると、少ない回数で破断に至ったことは理解できる。一方、実験ケース3については、作用させた荷重では塑性域に達せず、弾性域の範囲であったために、3,165回の繰返し回数が必要となったと考えられる。したがって、すでに塑性域に達した試験体に繰返し荷重を作用させた結果を疲労破壊として同一の現象とすることは無理があり、これを切り離して考える必要がある。例えば、針金をある場所を支点として折り曲げたあと、そこを何度も折り曲げると、すぐに外れてしまうことは周知のことである。折り曲がる前に、もとに戻る状況（弾性域内）において実験し、その結果で論じなければならぬというのが、今回の結論の一つである。

この仮説が正しいとすれば、実験ケース1及び2は塑性域、実験ケース3は弾性域の現象とすることができ、弾性域と塑性域の境界が最大荷重25kN（破断荷重の61%）と23kN（破断荷重の56%）の間にあることが推察できる。

また、この結果は、化学繊維ロープを繰返し荷重が作用するような用途で使用する場合は、外力の最大値がロープ破断強度の少なくとも60%以下となるロープを選定すべきであることを示している。

以上のことは、実験から得られた結果によって導かれた仮説に基づくものであり、今後さらなる実験により検証していく予定である。

## 6. まとめ

本研究により、ロープの計測から疲労試験に至る試験手順を確定でき、以下のことが把握された。

ロープ破断強度の56%以下の荷重による繰返し試験において、疲労破壊と考えられる現象を把握できた。

ロープ破断強度の61%以上の荷重による繰返し試験では、十数回の繰返し回数で破断し、荷重の違いは繰返し回数に影響しなかった。

ロープの破断箇所は、アイ加工を施した直近がほとんどであった。

また、以上の結果から、今回実験に使用した化学繊維ロープにおける作用外力に対する弾性領域と塑性領域の境界の存在、及びその境界が破断強度の61%未満で56%以上の範囲にあることを推定した。さらに、弾性範囲内での繰返し試験によって、本来の意味での疲労特性を把握できることを述べた。

最後に、本研究の実施に当たり、多大なる協力をいただいた独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構に対して謝意を表す。また、本研究は、東京製綱繊維ロープ（株）の委託研究の一環として実施されたことを記すとともに、試験体の製作に対して協力いただいた関係者に深謝するものである。

## 参考文献

- 1) (社) 全国漁港漁場協会 (2003): 漁港・漁場の施設の設計の手引き 下巻 第11編魚礁 第3章 浮魚礁.
- 2) (社) マリノフォーラム21 (1992): 浮魚礁設計・施工技術基準, MF21技術資料, No12.
- 3) 東京製綱繊維ロープ株 (2005): 合成繊維ロープ規格 (平成17年度版).
- 4) S Banfield・T Versavel・RO Snell・RV Ahilan (2001): Fatigue Curves for Polyester Mooring - A State-of-the-Art Review, OTC 12175.