合成繊維索の引張り疲労強度について

鶴 田 三 郎*

Tensile Fatigue Strength of Synthetic Fiber Ropes

Saburo TSURUTA

Abstract

The tensile fatigue properties of nylon ropes under cyclic loadings of constant amplitude were investigated. The test programme for unprotected single leg specimens was consisted of 3 parts.

(1) Straight break test; this test was carried out to arrive at an average breaking strength which was thereafter used as the control of cyclic load.

(2) Cyclic load test to failure; this test was carried out to obtain the relationships between failure life and maximum cyclic loads, and to compare this with that for the past data.

(3) Cyclic load test to set number of cycles followed by residual strength test; this test was carried out to obtain the basic data of the strength reduction of nylon rope after cycling. Research on the residual strength of synthetic fiber ropes after cycling is seldom found, although researchs on the failure life of the ropes were studied.

The followings have become clear by these tests.

(1) Failure life; there has been no significant difference between the present result and the already reported results. Using the load expressed with the proportion to breaking strength, the result has been almost independent both construction and temperature, in the range of 10°C to 30°C.

(2) Strength reduction; there has been the indication of fall off in strength prior to failure. This result has agreed with Flory's hypothesis on the strength reduction of synthetic fiber ropes.

1. ま え が き

合成繊維索は、現在船舶の係留用や引き船による操船用に、また海洋構造物の係留用にと種々用いられているが、使用に供されている索の強度については未だ十分に解明されてはいない。従来明らかではなかった合成繊維索の破断寿命に関する研究は、最近発表されるようになってきており⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾、繰返し引張り荷重を受ける索の破断寿命に関しては、ワイヤロープの試験結果に比較すると、データのばらつきは大きいものの、ある程度予測が可能になってきている。しかしながら破断寿命回数よりも少ない回数の荷重を受けた合成繊維索の強度（残存強度）についての研究はほとんどなされていない。破断寿命の予測も重要であるが、繰返し荷重や変動荷重を受けた索の強度を知り、それらの荷重を受ける索の残存強度を予測する事は、索を使用するに当って重要な問題である。

残存強度に関して Flory は、「繰返し荷重を受ける合成繊維索は荷重回数に比例して強度が減少し、破断寿命回数で繰返し荷重の上限に相当する強度になる。」という、金属の疲労強度に関して用いられる Miner 則に似た仮説を発表している⁽²⁾。しかしながら試験による確認は行なわなかった。Parsey は、疲労にはいくつかの原因が考えられるが、いずれの原因によっても残存強度は破断直前までほとんど低下しないと、湿潤状態のポリエステル索についての試験結果を示し述べている⁽⁶⁾。しかしながら結論を下すためには試験数が少ないと思われる。

* 正会員 東京商船大学運送工学科 (東京都江東区越中島2-1-6)

Flory と Parsey の説は著しく異なっているため、残存強度に関する試験を実施し検討する事とした。

そこで本研究では、片振り繰返し引張り荷重が加えられた合成繊維索の残存強度についての基本的なデータを得る事を目的とし、ナイロン索を供試索として、静引張り試験、引張り疲労試験及び繰返し引張り荷重を加えた索に対する静引張り試験（残存強度試験）を実施した。供試索の残存強度に関する基本的知見が得られたので、その結果を報告する。

2. 試験方法

2.1 供試索

供試索として、Fig. 1 に示すような両端にアイ加工を施したナイロン索を用いた。Table 1 に示すように2種類の異なる構成の索を対象とし、ダブルブレード索については実際に使用されているアイ入り係留索を製作している業者に供試索の製作を依頼し、三つより索については試験に参加した熟練したスタッフがアイ加工を施し供試索を製作した。これらのアイ加工の方法はいずれも通常施されている方法による。試験は容量 500kN の油圧式引張り試験機を用い、 $\pm 2^\circ\text{C}$ の範囲で室温制御を行なっている試験室において乾燥状態で行なった。三つより索に対しては JIS の標準

温度 20°C で、ダブルブレード索に対しては温度影響を見るため室温 10°C と 30°C で試験を行なった。供試索は試験を開始する48時間以上前から試験室に準備し、索の温度が均一になるようにした。供試索の直径は引張り試験機の容量から、余裕を見込んで20mmを主にする事とした。なお、試験機のラムストロークの最大は2.0mであり、いずれの供試索もこのストロークの範囲内で破断した。

2.2 試験方法

静引張り試験は供試索の平均的な引張り強度 (S_B) を求めるために行ない、この S_B を基準にして繰返し荷重の上限の大きさを決定した。繊維索の1コイルの長さは普通200mであって、同じコイルから得られる供試索の本数に限界があるため、われわれが供試索を製作した三つより索については、コイル毎に6本抽出し S_B を求めコイル毎の実験の基準の S_B とした。それぞれの静引張り試験は、同じシリーズの引張り疲労試験及び残存強度試験と同じ試験温度で行なった。Table 1 の引張り強度と標準偏差は、同じシリーズの全ての静引張り試験結果に対するものであり、三つより索の場合各コイル別の S_B は72.4~77.5kNの範囲に、標準偏差は5.28~10.65kNの範囲にあった。ダブルブレード索は、同じロットから全ての供試索を製作した。

引張り疲労試験は、今までに報告されている、主として湿潤状態で行なわれた疲労試験結果との比較を行なうために、また室温の影響や索の構成の違いによる影響を見るために行なった。 S_B を基準にして荷重の上限がその80%、70%、60%及び三つより索については更に50%の、そして荷重の下限が S_B の3%の繰返し引張り荷重を加え破断寿命回数を計測した。

残存強度試験は荷重の上限を60%とした試験を主とし、その他に70%及び40%の試験を、最大繰返し回数 10^4 回の範囲で行なった。引張り速度は静引張り試験においては JIS に準拠し150mm/minに、繰返し荷重試験においてはこれより速い300mm/minにした。繰返し荷重の1周期の時間は荷重回数とともに徐々に短くなるが、平均的には荷重上限が80%の場合約90 sec、60%の場合約70 secであった。

Table 1 Basic properties of test specimens

PROPERTY	ROPE	3-STRAND		DOUBLEBRAID	
		NYLON	NYLON	NYLON	NYLON
MATERIAL					
DIAMETER	mm	20	40	20	20
LENGTH					
OVERALL: L_{OA}	mm	3000	2900	3000	3000
EYE : L_E	mm	400	400	400	400
SPLICE : L_S	mm	100	200	600	600
TEMPERATURE	$^\circ\text{C}$	20	20	10	30
AVERAGE					
BREAKING	kN	75.3	245.	96.1	82.5
STRENGTH					
STANDARD	kN	8.44	28.7	7.03	8.70
DEVIATION					

Fig. 1 Form of test specimens

3. 試験結果及び考察

3.1 引張り疲労試験

破断寿命と繰返し荷重の上限との関係を, Fig. 2 に示す。荷重上限の値で比較した場合, ダブルブレード索については, S_B の大きい室温の低い方が寿命が長かった。破断寿命の対数値をとり, 同じシリーズの値の傾向を, 最小自乗法により一次近似したものが図中の直線である。三つより索とダブルブレード索とを比較した場合, 20℃の三つより索と30℃のダブルブレード索の破断寿命の平均的な傾向は, ほぼ同じであった。実際の荷重で見た場合, 同じ温度では三つより索の方が S_B は小さく破断寿命も短い。三つより索の S_B が小さいのは, ダブルブレード索の場合ほとんど同時に外層ストランドと芯索とが破断するのに対し, 三つより索の場合ストランド単位で1~2本破断する事が一因であると考えられる。索はいずれの場合も, アイと反対側のスプライス終了部で破断した。

破断寿命を図で示す場合, 荷重上限の値を S_B に対する割合で示すのが普通であり, この方法で破断寿命と繰返し荷重の上限との関係を示したのが Fig. 3 である。以後荷重は S_B に対する割合で示す。各シリーズの破断寿命の平均的な傾向を細い直線で, 全シリーズをまとめた径20mmのナイロン索の破断寿命の平均的な傾向を太い実線で図中に示す。太い実線と細い線との差は, 荷重上限が80%の場合20℃で最も大きく, 破断寿命回数の常用対数をとって比較すると, 20℃, 80%の標準偏差に対する比は0.90であった。上限が70%の場合差は20℃で最も大きく, 差の20℃, 70%の標準偏差に対する比は0.80であり, 上限が60%の場合差は10℃で最も大きく, 差の10℃, 60%の標準偏差に対する比は0.68であった。これらの事から, 破断寿命の平均的な傾向には, 室温の違いも, 三つよりとダブルブレードという索の構成の違いも, 顕著な影響を与えていないという事ができる。同図上に24mmのダブルブレード索に対して湿潤状態で行なった Crawford の結果を示す。

Crawford の試験点は少ないが, 今回の20mmの結果とほぼ同様の結果を示している。

破断寿命に及ぼす索径の影響を示したのが Fig. 4 である。白丸印は40mmの三つより索に対して, 索径の影響を見るため今回行なった試験結果を示している。また実線は Fig. 3 で示した20mmの平均的な傾向を示している。Crawford の結果⁽⁷⁾は湿潤状態の八つより索に対してのものであり, Flory の結果⁽⁵⁾は湿潤状態のダブルブレード索に対してのものであり, 文献から引用した。概略の値しか明らかでなかったため図中には示さなかったが, 約17mmの三つより索に対して行なった Leeuwen の結果⁽⁴⁾は, 実線で示した20mmの結果よりも全体としては寿命が短い側にある。また4mmの八つより索に対して湿潤状態で行なった Bitting の結果⁽³⁾は20mmの結果よりも大きく寿命の長い側にあった。全体としては索径の大きい方が破断寿命が短いという傾向がある。しかしながら, 20mmの索に対する結果が, 約17mmの索に対する結果より長く, Fig. 3 に示したように24mmの索に対する結果とほぼ同程度であるという事から, 索径が多少異なっても顕著な差は見られないという事もできる。破断寿命に関するそれらの報告の試験点が少ない事, また繊維索に対する試験結果は一般にばらつきが大きい事から, 今

Fig. 2 Cyclic load test results, maximum load vs. number of cycles(N)

Fig. 3 Cyclic load test results, proportional maximum load vs. number of cycles

Fig. 4 Cyclic load test results, size effect

回の結果は、径20mmのナイロン索の破断寿命としては、従来報告された結果と大差無い値を示していると思われる。

3.2 残存強度試験

Fig. 5, Fig. 6 及び Fig. 7 はそれぞれ荷重上限が S_B の70%, 60%及び40%である 残存強度試験 結果を示している。100回荷重後の残存強度は、20mmの場合70%で S_B に対して1.04倍、60%で1.03倍であり、図としては示していないが40mmの場合70%で1.06倍、60%で1.17倍であり、 S_B よりも平均値は大きくなっている。Fig. 7 の40%の場合もまた、 10^4 回の繰返し回数範囲では、残存強度はむしろ大きくなっている。これは繰返し荷重によってスプライス部にむらが無くなり、ヤーンやストランドに比較的均一に力が加わるようになったためであると考えられる。アイ加工を施した新索に対して、一定回数ある一定荷重を加える事により、使用上の強度を大きくする事が可能であると思われる。

Fig. 6の 10^3 回における残存強度を見ると、120%を超える大きな値も有る 反面80%以下の値もあり、Parsey がいうように索が破断の直前まで S_B の強度を保っているとはいえない結果となっている。40%の場合破断寿命が不明のため、Flory の仮説を適用した曲線を図中に引く事ができなかったが、Fig. 5 及び Fig. 6 の太い曲線は、 S_B と破断寿命の平均に対して Flory の仮説を適用したものである。破断寿命の平均に対する曲線にもかかわらず、各繰返し荷重回数における残存強度の平均を通る曲線にはなっていないという問題はあるものの、破断寿命に達する前の索の残存強度を安全側で与える曲線となっている。破断寿命の約95%に対して安全側の値を与える（破断寿命の平均値 $-2 \times$ 標準偏差）の値に対して Flory の仮説を適用した結果を細い実線で Fig. 5 及び Fig. 6 に示す。Fig. 6 において残存強度を示す32の試験結果のうち31の結果が、この曲線より残存強度が大きく、この曲線は試験結果の約97%に対して、安全側の残存強度を与える曲線となっている。この97%という値は破断寿命に関する95%という値と同程度の値となっている。今回の試験結果に対しては、残存強度を安全側で推定するために、Flory の「繰返し荷重を受ける合成繊維索の強度低下は荷重回数に比例する」という仮説は非常に有効であるという事ができる。

4. 結 言

本研究は両端アイ加工の直径20mmのナイロン索の、繰返し引張り荷重下での疲労特性について考察したもので

Fig. 5 Residual strength after set number of cycles
(maximum load level...70% of breaking strength (S_B))

Fig. 6 Residual strength after set number of cycles
(maximum load level...60% of S_B)

Fig. 7 Residual strength after set number of cycles
(maximum load level...40% of S_B)

ある。得られた主要な結果は次の通りである。

(1) 破断寿命について

乾燥状態で試験を行なったが、従来の湿潤状態で行なった結果と同様な結果が得られた。試験室の温度が10℃から30℃の範囲では、平均的引張り強度に対する比で荷重上限を示すと、室温や索の構成の違いは破断寿命にはほとんど影響を与えない。

(2) 残存強度について

一定回数繰返し引張り荷重が加えられた索の残存強度に、荷重上限が平均的引張り強度の60%の場合、破断寿命回数に達する前から強度が低下する徴候が見られた。この場合、Flory の残存強度に関する仮説は、この傾向を説明するとともに安全側の残存強度を与える。

今後は他の合成繊維索に対しても試験を行ない、Flory の仮説及び残存強度の推定方法について検討を加える予定である。

謝 辞

なお、本研究の一部は日本造船研究協会SR187研究部会の昭和58年度研究の一環として実施したものであり、同部会部会長安藤定雄氏並びに委員各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) J. L. Werth: An Evaluation of Materials and Rope Construction for Mooring Hawser Design, Offshore Technology Conference, Paper OTC 3851, p. 497, May 1980.
- (2) J. F. Flory: Strength Reduction Curve Method of Predicting Residual Strength, International Conference on Reliability, Stress Analysis, and Failure, August 1980.
- (3) K. R. Bitting: Fatigue Failure in Nylon Rope, Marine Technology Society Journal, Vol 14, No. 5, p. 20, November 1980.
- (4) J. H. V. Leeuwen: Dynamic Behaviour of Synthetic Ropes, Offshore Technology Conference, Paper OTC 4003, p. 453, May 1981.
- (5) J. F. Flory: New and Used Strength of Large Marine Hawsers, Offshore Technology Conference, Paper OTC 4304, May 1982.
- (6) M. Parsey: Fatigue of SPM Mooring Hawsers, Offshore Technology Conference, Paper OTC 4307, p. 71, May 1982.
- (7) H. Crawford and L. M. McTernan: Cyclic Testing of Continuously Wetted Synthetic Fiber Ropes, Offshore Technology Conference, Paper OTC 4635, p. 455, 1983.

質 疑 応 答

明渡範次：試験片の「つかみ」間隔はどのように設定しましたか。

鶴田三郎：ストローク量及び過去の経験から必ずストロークの範囲内で索が破断するように設定しました。

井上欣三：(1) ランダム外力についても Miner 則に従いますか。

(2) 疲労強度に影響しない下限荷重を見つける事ができますか。

鶴田三郎：(1) まだ明らかにはなっていません。今後の研究の課題です。

(2) 繰返し回数を試験の都合により制限したため、今回の結果からは明らかではありません。