縄の疲労に対する荷重振幅量の影響^{*1}

兼 広 春 之・鈴 木 誠

(1983 年 6 月 28 日受理)

Effect of Cyclic Load Amplitude on the Fafigue of Cords

Haruyuki KANEHIRO^{*2} and Makoto SUZUKI^{*2}

The fatigue properties of tuna branch lines (polyester and nylon) subjected to cyclic loading were investigated with various load amplitude. The maximum load imposed in each cycle was kept at 80% of their breaking load in all cases, and the cyclic load amplitude were varied in the range of 5-80% load. The number of cycles to failure and some mechanical properties were measured, and the sample was subsequently examined in the scanning electron micrograph (SEM).

It was observed that the fatigue life of the cord was remarkably influenced by the magnitude of the cyclic load amplitude. In the range of large load amplitude, fatigue breaks were seen to occur at very low cycles, whereas no breaks were obtained within 10^4 cycles in the range of small amplitude. SEM studies showed that the larger the cyclic load amplitude, the more the damage to the fiber. It was suggested that fatigue break of the cord was caused by the damage of the fiber due to the mutual abrasion between each strand. Furthermore, it was shown that there was a close relation between cyclic load amplitude and strain amplitude in each cycle. It was recognized that the elongational properties of the cord against cyclic load affected its fatigue behaviour to a great extent.

著者らはこれまで繰返し荷重下における合成繊維マグロはえ縄の疲労について研究を行い、それらの耐久性及び疲労のメカニズムについて論じてきた。^{1,2)} 従来、網糸の疲労寿命が繰返し荷重の大きさに大きく影響され、³⁻⁵⁾ 破断回数 (N) は最大荷重 (W_{max}) によってのみ決まり、それらの間に $W_{max} = a - b \log N$ の関係が成り立つことが知られている。³⁾ しかしながら、縄の疲労に対する荷重の周期的変化の較差すなわち最大と最小荷重の変動量の影響についての研究はほとんどみられない。

Hearle らの単繊維の疲労に関する研究によると、^{6,7)} 繊維の疲労は最大荷重だけでなく、最小荷重の大きさによっても大きく影響されることが報告されている。

本研究では、マグロ縄の枝縄を対象として、最大荷重は一定とし、一方最小荷重を種々変えて繰返し試験を行い、縄の疲労に対する荷重の振幅量の影響を調べ、さらに疲労のメカニズムについて検討を行った。

実 験 方 法

実験には、太さが直径 3.5~4.1 mm のポリエステル (長繊維) 及びナイロン (長繊維) の二種類の枝縄を使用した。それらの性状は Table 1 に示した。

本実験では、Fig. 1 に示すように 4 種類の異なった荷

Fig. 1. Comparison of different loading patterns. Cyclic load range (% of the breaking load); A: 0↔80% (80%), B: 20↔80% (60%), C: 40↔80% (40%), D: 75↔80% (5%). Where, the numerals in bracket indicate the magnitude of the cyclic load amplitude from the maximum load in each cycle.

重条件下で繰返し試験を行った。繰返しの最大荷重は、すべて一定すなわち強度の 80% とし、最小荷重をそれぞれ強度の 0% (A), 20% (B), 40% (C) 及び 75% (D) とし (以下、それぞれの荷重条件を A, B, C, D で表わ

^{*1} 本研究の要旨は昭和 58 年度日本水産学会春季大会において発表した。

^{*2} 東京水産大学 (Tokyo University of Fisheries, Konan-4, Minato, Tokyo 108, Japan).

Table 1. Characteristics of samples tested

Materials	Diameter (mm)	Number of twists (per 30 cm)			Breaking strength	Elongation at break
		Upper	Middle	Lower	T_0 (kgf)	L_B (%)
Polyester (F) 1000D $\times$ 6 $\times$ 3 $\times$ 3	3.63	25.8	83.0	1.0	209.0	39.6
Nylon (F) 1260D $\times$ 4 $\times$ 3 $\times$ 3	3.71	27.3	90.0	1.0	272.3	55.0

す), 繰返し荷重振幅量を変えた。したがって, 荷重振幅量は A, B, C, D の順に 80, 60, 40, 5% となる。最大荷重を強度の 80% に設定したのは, 縄の疲労に対する影響を短時間の試験で調べるためである。

繰返し荷重引張り試験は K. K. シンコー製の引張り試験機 (Model TCM-1000S) により行い, また繰返し回数 (N) の測定及び荷重-伸長曲線の記録は付属のサイクルカウンター (TCA-014) 及び自記記録装置 (RC-9001) を使用した。試料取り付け用クランプとしては, 前報¹⁾ 同様の筒状の巻き付け型のものを使用した。

繰返し試験は, 乾時の試料について 20°C, R. H. 65% の恒温恒湿室内で行った。繰返しの試験速度 (クロスヘッドスピード) は 500 mm/min とし, 0~10⁴ 回のサイクル数の範囲で試験を行い, 破断にいたるまでの回数及び試験中の試料の伸びの変化を測定した。10⁴ 回の繰返し試験で破断しなかった試料については, 試験を中断し室温で 48 時間以上放置した後永久歪を測定した。これらの試料については, さらに破断試験を行い, 残存強度と破断伸度を測定した。試料数は無処理のものについては 10 本, 繰返し試験については 2~3 本で, 測定値はそれらの平均値をとった。

試験した試料は, 走査型電子顕微鏡 (SEM) により, 繊維表面の微細観察を行った。

結果及び考察

疲労寿命に対する荷重振幅量の影響 4 種類の異なった荷重条件下で繰返し試験を行った結果を Table 2 に示した。試験荷重に対する破断回数の結果をみると, ポリエステル, ナイロンとも最小荷重が小さい, すなわち荷重振幅量の大きい A 及び B については少い回数で破断しており, 低い疲労寿命を示していた。一方, 最小荷重は大きい荷重振幅の小さい C 及び D では 10⁴ 回のサイクル数でも破断がみられず, 明らかに荷重振幅量により差が

Table 2. The results of fatigue test at different loading conditions

Materials	Loading condition*		Number of cycles to failure N_f
	W_{min} (%)	W_{max} (%)	
Polyester	A	(0 $\leftrightarrow$ 80)	252
	B	(20 $\leftrightarrow$ 80)	529
	C	(40 $\leftrightarrow$ 80)	>10 ⁴
	D	(75 $\leftrightarrow$ 80)	>10 ⁴
Nylon	A	(0 $\leftrightarrow$ 80)	161
	B	(20 $\leftrightarrow$ 80)	2503
	C	(40 $\leftrightarrow$ 80)	>10 ⁴
	D	(75 $\leftrightarrow$ 80)	>10 ⁴

* cyclic load range (% of the breaking load).

Fig. 2. Load-elongation curves of unbroken samples after cyclic testing of 10⁴ cycles. The notation C and D in the figure denote the loading conditions, as shown in Fig. 1. Dotted line: control.

認められた。

荷重—伸度曲線の変化 10^4 回の繰返し試験でも破断しなかった C 及び D の試料については、さらに引張り破断を行い、残存強度及び破断伸度を測定した。Fig. 2 にそれらの荷重—伸度曲線を示した。ポリエステル、ナイロンとも、 10^4 回の繰返し試験後の試料は試験前のそれと比べ、荷重—伸度曲線の立ち上りが大きくなっており、それとともに破断伸度の低下が認められる。しかしながら、破断強度については、試験前と比べてもほとんど低下はみられない。ポリエステルとナイロンの比較では、前者の方が曲線の立ち上り及び伸度低下が大きい、これは両者の荷重に対する伸長回復性の差によるものと考えられる。¹⁾

すでに報告した^{1,2)} ように、繰返し試験にともなう荷重—伸度曲線の立ち上り及び伸度の低下は、主として繰返し荷重による縄の構造上の伸びによって生じたものであると考えられる。

また、図より荷重条件によっても曲線の立ち上りと伸度低下の度合に差がみられ、ポリエステル、ナイロンとも荷重振幅の最も小さい D の方がその度合が小さかった。

残存強度及び伸度の変化 各試料の破断伸度及び残存強度、残存伸度等の測定結果を Table 3 に示した。表中の A 及び B の破断伸度は試験中 10^4 回以内で疲労破断した試料の破断直前の伸度である。破断直前の伸度は、後に述べる繰返し試験中の試料の最大伸度の経時変化 (Fig. 4) から外挿により見積った。Table 3 に示すように、試験中に破断した A 及び B の伸度は試験前の値 (Table 1) に比べ多少低下していた。破断伸度の低下は繰返し試験による縄の疲労によって生じたものと考えられる。同様な破断伸度の低下は、Hearle ら^{6,7)} による単繊維の疲労試験においても報告されている。

一方、 10^4 回の試験でも破断しなかった C 及び D の試料については、破断伸度の大きな低下が認められる。しかしながら、この伸度の低下は繰返し試験によって生じた永久歪の分だけ見掛け上伸度が低下したことによるものと考えられる。永久歪と試験後の破断伸度から見積られる試料の全伸度量をみると、試験前の値と比べ、伸度の低下は起っていないことがわかる。しかしながら、永久歪及び破断伸度の大きさは荷重条件により多少異なっており、荷重振幅の小さい D の方が C よりも永久歪が小さく、一方破断伸度は大きい値を示した。

残存強度についても、C、D とも強度低下はみられず、むしろ D については強度の増大さえみられた。

これらの結果より、縄の疲労し易さが荷重振幅量の大小に著しく影響されることがわかった。一般的には、試験中常に高荷重がかかっている D、C よりも、各サイクル毎に最小荷重を 0 あるいは低荷重に戻し、継続的にかかる張力をゆるめた A、B の方が疲労しにくいように思えるが結果は全く逆であった。

電子顕微鏡観察 試料の破断及び疲労の状態を調べるため電子顕微鏡観察を行った。繰返し荷重下での縄の疲労が局所的な場所、すなわちストランドが相互に内接しあう部分で起こることはすでに報告した。²⁾ Fig. 3 に疲労試験を行った試料の電子顕微鏡写真を示した。写真はすべてストランド間の内接部分の状態を示したものである。

Fig. 3 の (1) 及び (2) は、それぞれポリエステルとナイロンについて荷重振幅量 80% 下で繰返し試験を行い、285 回及び 197 回で破断した試料の写真である。ポリエステル、ナイロンとも繊維に著しい摩擦による損傷がみられる。特に、ナイロンでは摩擦により繊維が部分的に融けているほどであった。事実、疲労破断した試料は、剛さの著しい増大とともにストランド間の融着が観察さ

Table 3. Mechanical properties of cords after fatigue test

Materials	Loading condition* ³		Permanent elongation L_P (%)	Elongation at break L_B (%)	Total elongation L_T (%)	Residual breaking strength T (kgf)	T/T ₀
	W_{min} (%)	W_{max} (%)					
Polyester	A (0↔80)		—	39.0	—	—	—
	B (20↔80)		—	38.3	—	—	—
	C (40↔80)		13.0	24.0* ¹	40.1* ²	201.0	0.96
	D (75↔80)		10.3	28.0* ¹	41.2* ²	218.0	1.04
Nylon	A (0↔80)		—	52.0	—	—	—
	B (20↔80)		—	53.9	—	—	—
	C (40↔80)		8.0	43.5* ¹	55.0* ²	272.5	1.00
	D (75↔80)		4.1	50.7* ¹	56.8* ²	291.5	1.07

*¹ residual breaking elongation after cyclic testing of 10^4 cycles.

*² total elongation (L_T) was evaluated from permanent elongation (L_P) after cyclic testing and breaking elongation (L_B) by the following relation: $(1 + L_T/100) = (1 + L_P/100) (1 + L_B/100)$.

*³ cyclic load range (% of the breaking load).

Fig. 3. SEM photographs of polyester and nylon cords after cycling at different loading conditions.

(1)–(2); Surface detail showing a remarkable damage of the fiber due to abrasion between the mutual contacted strands. Polyester ((1)-a; $\times 40$, -b; $\times 240$) and nylon cord ((2)-a; $\times 16$, -b; $\times 80$) broke in 285 and 197 cycles, respectively, at the load amplitude of 80%.

(3)–(4); Surface detail showing a remarkable damage of the fiber due to abrasion. Polyester ((3)-a; $\times 40$, -b; $\times 240$) and nylon cord ((4)-a; $\times 40$, -b; $\times 240$) broke in 511 and 2632 cycles, respectively, at the load amplitude of 60%.

(5)–(6); Surface detail showing less damage to the fiber as compared with the case of the higher load amplitude of (1) to (4). Polyester ((5)-a; $\times 80$, -b; $\times 240$) and nylon cord ((6)-a; $\times 80$, -b; $\times 160$) unbroken after cycling of 10^4 cycles at the load amplitude of 40%.

(7)–(8); Surface detail showing no damage to the fibers. Polyester ((7)-a; $\times 80$, -b; $\times 240$) and nylon cord ((8)-a; $\times 80$, -b; $\times 240$) unbroken after cycling of 10^4 cycles at the load amplitude of 5%.

れた。

Fig. 3 の (3) 及び (4) は、荷重振幅量 60% において、それぞれ 511 回及び 2632 回で破断したものである。(1) 及び (2) と比べて、破断回数に差はみられるものの、同様に繊維の著しい摩耗、損傷が認められる。

Fig. 3 の (5), (6) 及び (7), (8) はそれぞれ荷重振幅量 40% (C) と 5% (D) についての結果であり、すべて 10^4 回の繰返し試験後の未破断試料の写真である。振幅量 40% では、先に示した (1) ~ (4) に比べると、繊維の損傷が非常に少なくなっていることがわかる。ナイロンでは、まだ繊維の摩耗が多少みられるが、ポリエステルではわずかに認められる程度であった。さらに、振幅量が最も小さい 5% では、写真からも明らかなように、ポリエステル、ナイロンとも繊維に認めうる変形や損傷はみられなかった。

電子顕微鏡観察の結果では、荷重振幅の大きいものほど繊維の損傷の度合が大きく、これは前述の疲労試験の結果すなわち荷重振幅量の大きいものほど疲労の度合が著しい結果と対応している。

伸度に対する荷重振幅量の影響 繰返し荷重に対する繩の伸びの大小が、その耐疲労性に大きく影響することはすでに報告した²⁾が、以下に異なる荷重振幅下での試料の伸度変化について検討を行った結果を示す。

Fig. 4 はポリエステルとナイロンについて、繰返し試験中の試料の伸度変化を示した結果である。図中の実線及び点線は、それぞれ各サイクル毎の最大荷重及び最小荷重時の伸度である。Fig. 4 から、最大伸度と最小伸度はともにサイクル数に対してほぼ直線的に増大してい

た。そのうち最大伸度は荷重条件によらずほぼ一定であり、ポリエステルで 35~40%、ナイロンで 48~52% であった。一方、最小伸度は荷重振幅量により大きく異なっており、 $A < B < C < D$ の順に大きくなっていった。特に、荷重振幅量の最も小さい D では、最小伸度は最大伸度には近い値であり、試験中試料が常に伸びた状態にあることを示している。

Fig. 5 に最大と最小の伸度差 (Δl_n) と荷重振幅量との関係を図示した。この図では、 $N=100$ サイクルにおける Δl_n と荷重振幅量との関係を例示したが、他のサイクル数でもほぼ同様な結果が得られた。Fig. 5 から、荷重振幅量の増加とともに Δl_n が急激に増大しており、明らか

Fig. 5. Relation between strain amplitude in each cycle and cyclic load amplitude at $N=100$ cycles. Where, $\Delta l_n = l_{n(\max)} - l_{n(\min)}$.

Fig. 4. Changes of elongation in each cycles during testing. $l_{n(\max)}$ and $l_{n(\min)}$ shown in the figures indicate the maximum elongation and the minimum elongation in each cycle, respectively. The notation A, B, C and D in the figures denote the loading conditions, as shown in Fig. 1.

に1サイクルあたりの試料の伸度差すなわち伸び縮みの大きさが著しく異なっていることがわかる。先に示した縄の耐疲労性の結果と対比すると、荷重振幅に対して試料の伸縮が大きいものほど疲労しやすく、一方伸縮の小さいものではほとんど疲労しないことがわかる。

荷重的には、振幅の最も小さいDの場合、常に大きな荷重がかかっており、また試料の伸びも大きいにもかかわらず、実際には最も疲労しにくいという結果が得られた。このことは、縄の疲労が繰返しの最大荷重の大きさよりはむしろ荷重の変動量の大きさによって大きく影響されることを示している。また、電子顕微鏡観察の結果を併せて考えると、縄の疲労破断がストランド相互間の内部摩擦による繊維の損傷に起因するものであり、またストランド間の摩擦が荷重の変動に伴う縄の伸縮によって起こるものと考えられる。

これらの結果から、縄の実際の使用に際しては、作用する最大荷重を考慮するとともに、荷重の変動量をなるべく少なくすることが耐久性において効果的であると考えられる。

要 約

最大荷重を一定とし、荷重振幅量が5~80%の範囲で繰返し試験を行い、縄の疲労に対する荷重振幅量の影響を調べ以下の結果を得た。

1. 縄の疲労寿命は荷重振幅量によって異なり、荷重振幅量が大きいほど寿命は短い。

2. 電子顕微鏡観察の結果、縄の疲労破断は、ストランド相互間の摩擦による繊維の損傷に起因するものであり、繊維の損傷の度合は荷重振幅量の大きいものほど大きい。

3. 荷重振幅量と試料の伸縮量是对応関係にあり、したがって伸縮量が疲労に直接的に関与するものであると考えられる。

これらの結果から、縄の耐疲労性は最大荷重が同じならば荷重振幅が大きいほど、すなわち、伸縮量が大きいほど劣ることが示唆された。

なお本研究の一部は、昭和56年度文部省科学研究費補助金によったものである。

文 献

- 1) 兼広春之・鈴木 誠・松田 俊：東水大研報，**69**(2)，97-108 (1983)。
- 2) 兼広春之・鈴木 誠・松田 俊：東水大研報，**69**(2)，109-116 (1983)。
- 3) 田内森三郎・安田秀明：水産物理談話会報，**6**，35-38 (1929)。
- 4) K. HONDA: *J. Tokyo Univ. Fish.*, **40**, 81-85 (1953)。
- 5) 本多勝司：日水誌，**44**(12)，1295-1307 (1978)。
- 6) A. R. BUNSELL and J. W. S. HEARLE: *J. Mat. Sci.*, **6**, 1303-1311 (1971)。
- 7) A. R. BUNSELL and J. W. S. HEARLE: *J. Appl. Polym. Sci.*, **18**, 267-291 (1974)。