

林業用鋼索の疲労に関する研究 第5報

主索 (6×7, JIS 1号) の疲れ寿命試験

柴 田 順 一⁽¹⁾

Jun-ichi SHIBATA: Study on the Fatigue of Wire Rope for Logging (V)
 Fatigue-life test of standing skyline (6×7, JIS No. 1)

要 旨：林業用架空線集材装置の主索として用いられている、6×7 24 mm (JIS 1号) ワイヤロープの小角度曲げ疲れ試験を行った。実験の方法は前報 (林試研報 213号「林業用鋼索の疲労に関する研究 第2報」) で得た結果にもとづいている。試験条件は引張力 12,000 kg (条件1) および 8,000 kg (条件2)、横荷重は 1,500 kg であり、ワイヤロープが受ける最大曲げ応力はそれぞれの条件で 68.22 kg/mm² および 83.55 kg/mm² である。寿命の判定は 1 より長さの間に 4 本の素線断線が生じた時点とし、それまでの走行車輪の往復回数を寿命値とした。疲れ試験の試料の総数は 101 本であり、およそ次のような結果を得た。

疲れ寿命試験における寿命値の平均と標準偏差は、条件1では 12,955 および 2,140 であり、条件2では 10,342 および 1,933 であった。寿命の確立密度関数として、対数または真数正規分布をあてはめることができた。寿命に達したワイヤロープの引張り強さ (残留強さ) と切断エネルギー (残留エネルギー) を新品時のそれと比較すると、残留強さはおよそ 70~90%、残留エネルギーではおよそ 19~53% であった。残留強さと残留エネルギーの間には高い相関関係が認められた。疲れの進行にともなう素線断線の増加傾向が明らかになったが、初期断線の発生時期は寿命のおよそ 75% の時点であった。

はじめに

林業用架空線集材装置は、架設と集材作業および撤収が比較的短期間にくりかえされ、各々の作業現場の地形条件と作業条件に応じて架設されるため、使用されるワイヤロープの使用条件はそのたびに異なる。主索についてみれば、先柱と元柱の支点間距離、緊張度、吊荷重量、張力などの点で、架設するたびに異なった条件のもとで使用される。主索として使われるワイヤロープは、使われはじめてから使用限度に達したとして廃棄されるまでの間、一定の条件のもとで使用されることはほとんどない。したがって、ワイヤロープの使用限度や寿命あるいは耐久性について、確かな実績をデータとして得ることがむずかしい。また、ワイヤロープの種類や品質の差にもとづく寿命を実際の使用実績から比較することも必ずしも容易ではない。

そこで、一定の条件を設定できる試験機を用いたワイヤロープの疲れ試験によって、その寿命をはじめとする疲れ特性を明らかにすることが必要となる。これによって得られる結果から、集材架線として使われるワイヤロープの使用と保守、管理上役に立つ資料を得ることができると考える。

集材架線の主索は大きな引張荷重に耐えるとともに、その上を走行する車輪を大きな集中荷重として受ける点で厳しい使用条件にさらされる。このような林業用ワイヤロープの主索に関する疲れ試験の方法と結果については、第2報⁵⁾において検討した。今回の試験ではこの結果にもとづいて、実際の集材作業に

使うために購入されたワイヤロープの中から試料を集めて、小角度曲げ疲れ試験機による実物試験として疲れ試験を行った。対象としたワイヤロープの構成は 6×7 C/L A 種 24 mm 径で、日本工業規格 (JIS G3525) に 1 号品として規定されている種類のものである。

本報告にまとめたデータは、林野庁業務課が実施している一連のワイヤロープ疲れ試験の結果の一部である。この試験の設計と試験方法については、林業試験場前機械科長 上田 実氏および元同機械第 1 研究室主任研究官 斎藤敏彦氏が参画し、試験は林業試験場機械化部機械第 1 研究室との連繋のもとに、長野営林局上松運輸営林署に設けられたロープ試験室において実施された。担当された方々は、井上 明・田中浅次郎・大畑敏夫・平山 実・岩原重雄・林 悦男・小沢一夫・佐々木 一・神田昭男の諸氏である。

ここで得られた試験の結果は当初の計画にしたがって収集分析され、これまで各段階でそれぞれの目的に沿ってまとめられ活用されたものであるが、本報告ではこれら数次にわたる試験結果の全体を一般的な見方で総合して分析し、6×7 C/L 24 mm ワイヤロープの疲れ特性を明らかにすることを目的とした。

本報告をまとめるにあたり、長期間にわたって直接これらの試験を担当された方々をはじめ、この試験の遂行にご尽力された関係各位に敬意を表するとともに、これらの貴重なデータの公表をお許しいただいたことに感謝します。また有益なご助言とご指導あるいはご協力をいただきました多数の方々に対し深く感謝の意を表します。

1. 試験方法

構成が 6×7 C/L A 種で示されるワイヤロープで、直径 24 mm のものを試験の対象とした。試験の方法は第 2 報¹⁾の結果にもとづくこととしたが、試験機は直径 26 mm のワイヤロープまで試験できる大型の試験機を新たに作ってこれを使用した。この新しい試験機の基本的構造と駆動方法および運転の方法は、第 2 報¹⁾で用いたものと同一である。

1.1 供試ワイヤロープ

現在林業用集材架線の主索に用いられているワイヤロープの種類は、形状と構造からみて数種類あり、索線抗張力の差や製法上の差などを考慮すると 20 数種類に及ぶとみられる。これらの中で本報告で対象としたものはその構成が 6×7 C/L A 種で、直径 24 mm のものである。林業で使用されるワイヤロープの種類もこれまでいくつかの変遷を経た中で、この種類のワイヤロープは主索としてその耐摩耗性・柔軟性と取扱いやすさがよく調和しており、現在でももっとも基本的なものとして広く使われている。

供試ロープは国有林野製品生産事業において集材架線に使う目的で購入された 6×7 C/L A 種 24 mm のワイヤロープの中から収集したが、一部は製造会社から直接購入したのも含まれている。購入時に添付された検査証などの標示では全て A 種でありそれ以外のものはなかった。

集められた試料は便宜上、六つの製造会社ごとのグループに分けて、A～F の記号を付した。これらの記号はこれまでのワイヤロープの疲れ試験に関する報告¹⁾²⁾³⁾⁴⁾に用いた記号とは無関係である。

試験の実施時期は昭和 42～52 年であり、試料とするワイヤロープの収集の時期は、それぞれの試験を実施する直前ないしおよそ 2 年前であった。試料の数は 31 本であり、疲れ試験を行った総数は 101 本である。

1.2 試験装置

ワイヤロープ小角度曲げ疲労試験機の構造の詳細は前報⁹⁾にあるが、今回用いた試験機の概要はつぎのとおりである。

供試ワイヤロープは2.5 mでその両端は合金ソケット止め加工され、試験機に鉛直方向にピンで連結される。ロープは力の方向に向くことはできるが、ロープ軸のまわりの回転はできないように固定されている。上端は固定端であるが下端は張力負荷用重錘を支えるてこ比1:10のレバーに連なり、試験中一定の軸方向の張力を負荷される。供試ワイヤロープは走行車輪を通して、重錘と吊荷索によって横方向の荷重を受ける。走行車輪は駆動装置に連なる駆動索により、供試ワイヤロープに沿って上下方向に往復運動する。走行車輪は2個のシーブからなっており、シーブ溝の谷径は150 mm、溝底曲率半径は13.2 mmである。走行車輪の往復する距離は120 cmで速度は毎分17往復である。

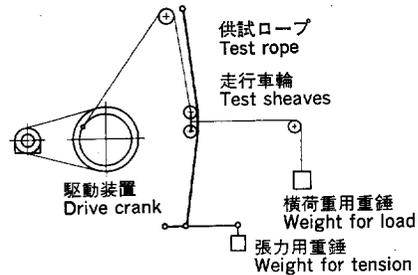


Fig. 1. 小角度曲げ疲れ試験機
Schematic of the wire rope fatigue testing machine.

1.3 試験条件と検査項目

- ① 疲れ寿命試験 寿命の判定基準はワイヤロープ1より長さの間に構成索線数の10%の断線とする。したがって6×7構成のワイヤロープでは、1より長さの間に4本の断線、または、同一のストランドに近接して3本の断線が発生した時点をも寿命とする。寿命はこのときまでの走行車輪の往復回数で表す。

試験条件として、つぎの2条件を設定した。

条件1 索張力 12×10^8 kg, 横荷重 1.5×10^8 kg

条件2 索張力 8×10^8 kg, 横荷重 1.5×10^8 kg

一つの供試ワイヤロープについて、条件ごとに2回のくり返し試験を行った。この2回の結果に著しい差があったときにはさらに1回の試験を追加した。

- ② ワイヤロープ切断試験 新品の供試ワイヤロープと、①の疲れ寿命試験が終ったワイヤロープについて、引張試験によってその切断荷重を測定する。またこのとき得られる荷重一伸び線図から切断エネルギーを求める。切断試験におけるワイヤロープの試料長さはおよそ120 cmである。
- ③ 外観検査 供試ワイヤロープを平らな床に延ばした状態で、うねり・ストランドや索線の飛び出しや落ち込み・型崩れ・よりきず・錆など、外観上の欠点の有無とその程度を調べた。
- ④ 製品検査 ワイヤロープの直径・より長さ・型付率・心綱の種類と直径と番手総数および紙テープの測定または確認を行った。
- ⑤ 索線検査 索線直径の測定、顕微鏡による索線表面はだと脱炭の程度の検査を行った。表面はだと脱炭の程度を調べるには、あらかじめ用意した5段階の写真と対比しながら、各索線1本ごとにA(良好)～E(不良)のランクづけをした。

Table 1. 試 験
Result showing fatigue life

試料 Sample	寿命試験 Fatigue life test						新品切断試験 New wire rope tensile test		
	① T=12,000 kg Q=1,500 kg			② T=8,000 kg Q=1,500 kg			切断荷重 Breaking force ($\times 10^3$ kg)	伸び率 Elongation (%)	切断エネルギー Breaking energy ($\times 10^3$ kg·m/m)
	往復回数 Cycles to life (回)	切断荷重 Reserve breaking force ($\times 10^3$ kg)	切断エネルギー Breaking energy (10^3 kg·m/m)	往復回数 Cycles to life (回)	切断荷重 Reserve breaking force ($\times 10^3$ kg)	切断エネルギー Breaking energy ($\times 10^3$ kg·m/m)			
A-1	18,000	25.0	0.220				35.5	4.45	1.08
2	18,500	26.7	0.335				35.8	4.49	1.09
3	12,500	28.6	0.380				36.4	4.57	1.19
4	8,500	30.2	0.350				36.8	5.04	1.24
5	12,000	30.9	0.440				37.1	5.15	1.33
6	10,000	28.5	0.365				35.2	5.22	1.31
7	14,500	28.8	0.342				36.4	5.63	1.45
8	15,000	30.0	0.397				35.5	4.85	1.15
9	11,600	31.4	0.510	11,200	30.2	0.345	36.8	4.67	1.21
	12,500	31.7	0.560	10,000	32.1	0.550			
10	14,100	29.8	0.435	9,900	28.9	0.390	36.7	4.80	1.22
	11,400	31.5	0.570	10,100	28.3	0.380			
	13,100	31.1	0.545						
11	13,800	28.8	0.279	12,800	31.6	0.476	37.0	4.82	1.33
	13,800	33.0	0.647	11,600	33.0	0.550			
12	11,700	33.3	0.520	9,200	31.3	0.431	36.9	5.02	1.35
	14,100	29.0	0.321	10,400					
	13,300	28.8	0.331						
mean	13,244	29.84	0.4193	10,650	31.01	0.4634	36.31	4.890	1.243
B-1	16,500	31.2	0.420				37.5	4.65	1.21
2	12,900	32.4	0.565	12,800	30.2	0.435	38.8	4.90	1.34
	13,200	30.0	0.400	11,300	30.5	0.400			
3	15,500	33.6	0.515	12,300	30.7	0.322	39.7	4.75	1.30
	14,700	34.5	0.580	10,900	32.5	0.425			
4	9,400	30.8	0.340	7,600	29.0	0.308	37.0	5.32	1.44
	9,800	27.9	0.279	8,400	31.0	0.454			
5	8,900	30.3	0.432	8,100	29.1	0.332	37.0	5.64	1.50
	11,000	31.7	0.516	7,800	30.5	0.358			
	10,400	27.9	0.336						
mean	12,230	31.03	0.4383	9,900	30.44	0.3793	39.78	5.050	1.354
C-1	10,500	27.3	0.415				37.9	5.64	1.53
D-1	11,300	34.2	0.665	6,900	28.5	0.288	39.5	4.94	1.33
	10,200	32.2	0.440	7,500	32.8	0.435			
2	11,600	32.5	0.510	7,500	35.0	0.660	39.5	4.82	1.32
	13,700	35.8	0.705	8,900	32.3	0.505			

結 果
and other measured values

製 品 検 査
Wire rope inspection

鋼索直径 Wire rope diameter (mm)	ピッチ Wire rope pitch (mm)	型付率 Preforming percentage (%)	外層線の径 Diameter of outlayer (mm)	内層線の増径率 Enlarging ratio of innerlayer (%)	脱炭 Decarburization					表面あらさ Roughness of wire surface				
					A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
					25.07	194.9	90.3	2.65	5.74	1	5	1		
25.31	196.1	89.8	2.62	7.13	1	1	5			3	4			
25.46	194.2	90.1	2.66	7.22	2	2	3				2	3	2	
25.63	195.0	92.0	2.68	4.67	3	2	2			3	3	1		
25.20	188.8	93.7	2.66	5.46	1	4	1	1		3	3	1		
25.49	192.3	93.1	2.65	5.78	1	2	2	2		3	3	1		
25.61	186.0	94.8	2.66	5.52	1	5	1				7			
25.48	184.9	95.6	2.66	5.84	1	6					7			
25.07	188.4	92.2	2.66	6.35	2	1	1	3		4	2	1		
25.01	188.4	95.0	2.67	5.50	3	2	1	1		3	1	2	1	
24.35	191.3	93.6	2.68	5.22	4	1	2			4	3			
24.38	192.0	92.8	2.68	5.52	6	1				2	4	1		
25.172	190.74	92.75	2.661	5.829										
24.86	198.9	89.9	2.65	4.53		7					1	4	2	
25.59	183.0	91.3	2.67	3.89	6	1				4		2	1	
25.60	185.1	91.6	2.68	3.89	4	3				2	5			
24.86	189.2	92.3	2.66	5.84	7					3	2	1	1	
24.79	188.9	92.2	2.66	5.26	7					3	2	1	1	
25.140	189.02	91.46	2.664	4.682										
25.62	194.1	84.4	2.65	5.66	1	3	3			5	2			
25.15	191.8	96.3	2.68	8.46	7					1	3	2		
25.02	191.6	96.4	2.69	7.81	3	3	1				5	2		

Table 3. (つづき) (Continued)

試料 Sample	寿命試験 Fatigue life test						新品切断試験 New wire rope tensile test		
	① T=12,000 kg Q=1,500 kg			② T=8,000 kg Q=1,500 kg			切断荷重 Breaking force ($\times 10^3$ kg)	伸び率 Elongation (%)	切断エネルギー Breaking energy ($\times 10^3$ kg·m/m)
	往復回数 Cycles to life (回)	切断荷重 Reserve breaking force ($\times 10^3$ kg)	切断エネルギー Breaking energy ($\times 10^3$ kg·m/m)	往復回数 Cycles to life (回)	切断荷重 Reserve breaking force ($\times 10^3$ kg)	切断エネルギー Breaking energy ($\times 10^3$ kg·m/m)			
3	12,100	33.5	0.565	13,000	27.2	0.226	38.8	4.95	1.40
	15,100	34.0	0.565	13,000	31.0	0.399			
	14,900	30.5	0.386						
4	15,100	33.6	0.527	9,900	28.9	0.321	39.0	4.89	1.39
	12,700	33.2	0.508	12,100	26.8	0.295			
	14,800	29.5	0.362	10,900	33.9	0.524			
mean	13,150	32.90	0.5233	9,967	30.71	0.4059	39.15	4.898	1.359
E-1	16,500	30.0	0.395				38.6	5.77	1.59
2	10,300	31.3	0.510	12,100	29.0	0.400			
	9,800	31.5	0.470	14,600	26.5	0.275	36.3	5.41	1.42
3	13,000	29.2	0.390	10,300	30.0	0.420			
	11,600	30.5	0.405	8,500	30.0	0.390	36.0	5.20	1.30
4	11,400	33.4	0.756	14,700	29.2	0.477			
	13,400	31.8	0.605	10,200	27.5	0.336			
	13,800	30.5	0.463	8,600	32.3	0.535	36.8	5.51	1.50
5	11,500	31.2	0.526	10,000	32.2	0.520			
	13,800	32.4	0.634	12,700	29.2	0.439			
	13,800	32.0	0.665	11,300	29.7	0.380	36.9	5.73	1.54
mean	12,627	31.25	0.5290	11,300	29.56	0.4172			
F-1	15,500	27.1	0.295	10,900	29.8	0.460	36.0	5.03	1.30
	13,000	29.6	0.450	11,100	29.3	0.365			
2	14,500	28.5	0.430	10,400	27.6	0.340	36.3	5.13	1.37
	14,500	31.7	0.630	9,500	30.9	0.405			
3	13,500	31.3	0.504	8,000	30.7	0.405	35.8	5.06	1.30
	13,700	31.0	0.472	9,500	25.7	0.244			
4	12,700	30.9	0.440	9,800	29.7	0.408	35.4	4.99	1.22
	12,400	31.5	0.502	8,400	31.2	0.461			
mean	13,725	30.20	0.4654	9,700	29.36	0.3860	35.85	5.050	1.295
Total mean	12,955	30.85	0.4676	10,342	30.20	0.4106	37.33	5.063	1.328

試験の実施中は次の点についてはとくに注意を払った。

- (1) 走行車輪である試験用シープは火災焼入れをして、溝面の硬度をH_{RB} 60程度としたものを使用し、長時間の使用で溝面に少しでも凹凸がみられた時は新しいものと交換する。
- (2) シープの軸受は常に正常な状態に保つ。
- (3) 走行車輪の溝面にはロープ油が付着するが、この油は供試ワイヤロープを交換するごとに完全にのぞく。
- (4) 供試ロープの表面に砂などの異物が付着することがないようにし、ロープ油は取り除かない。

2. 試験結果

試験の結果のおもな項目について Table 1 に示す。

疲れ寿命試験においてワイヤロープが受ける最大曲げ応力を前報⁵⁾にしたがって求めることができる。

$$\text{最大曲げ応力 } \sigma_b = \frac{V}{A} \sqrt{\frac{E}{\sigma_t}} \dots\dots\dots(1)$$

ここに $A=B/\sigma_B$, ロープ断面積 σ_B : 素線の抗張力
 $\sigma_t=T/A$, 引張応力 E : 引張弾性係数
 B : ロープの切断荷重 V : 輪荷重
 T : ロープの張力

この式中の各変数は、ワイヤロープの規格と設定した試験条件から、 $B=34,900 \text{ kg}$, $\sigma_B=165 \text{ kg/mm}^2$, $E=21,000 \text{ kg/mm}^2$, $V=1500/2 \text{ kg}$ であり、 σ_t は条件1では $\sigma_{t1}=56.73 \text{ kg/mm}^2$, 条件2では $\sigma_{t2}=37.82$

kg/mm^2 となる。これらの数値から最大曲げ応力を求めると、条件1における最大曲げ応力 $\sigma_{b1}=68.22 \text{ kg/mm}^2$, 条件2における最大曲げ応力 $\sigma_{b2}=83.55 \text{ kg/mm}^2$ となる。

供試ワイヤロープのロープ直径、切断荷重および素線径の測定結果と、ワイヤロープの規格 (JIS G3525) に示されている数値とを比較すると以下のとおりとなる。

ワイヤロープ直径についてみると、規格によれば公称径の +7%, -0% の許容範囲が与えられており 24 mm 径の場合は 24.0~25.68 mm がその範囲となる。実測値の頻度分布を Fig. 2 (a) に示す。24 mm ロープの許容範囲を超えているものはなく、最小値 24.35, 最大 25.62 mm といずれもこの範囲に入っている。

ワイヤロープの切断荷重の測定値の頻度分布を Fig. 2 (b) に示す。JIS 規格によれば 6×7 24 mm, A種ロープの切断荷重は 34.9 ton である。測定値は全てこれより大きい。全体の平均は 37.33 ton であり、35.9~37.4 ton の測定値が多く、最大 39.8 ton までである。同じワイヤロープで B 種ロープの切断荷重 38.1 ton と比較すると、

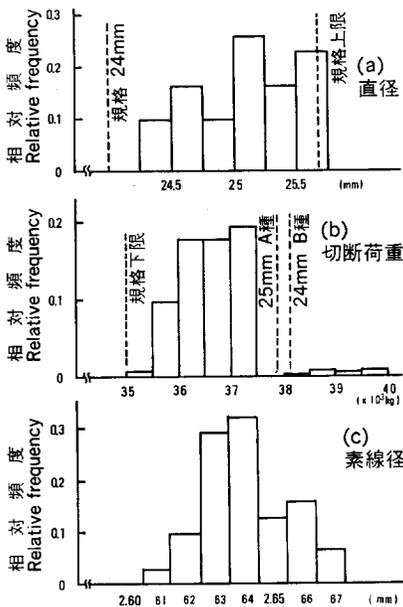


Fig. 2. ワイヤロープ直径、切断荷重および素線径の頻度分布

Frequency of diameter, breaking force of wire rope and diameter of wire.

全体のおよそ1/3はこのB種の値を超えている。また6×7A種ロープで直径が1ランク上にあたる25mm径の規格値は37.9tonであり、この値より大きなものが13例ある。規格の切断荷重は下限を示すものだから、これを超えていることは容認される。切断荷重に大きな差があるときは、素線の抗張力が異なり、したがって硬度が高く、ワイヤロープとして使うときに取扱いやすさその他の点で若干の差が生じ、耐疲労性も差があるのではないと思われる。しかし今回の試験ではこの点についてA種とB種の区別にはこだわらず、切断荷重という一つの要因として考慮することとした。

ワイヤロープを構成する素線径については規格の解説表1に数値が示されており、24mm、6×7の場合は2.62mmである。測定値の頻度分布図をFig.2(c)に示す。素線径は2.61~2.69mmの間にあり、1例だけが規格値をごくわずか下まわっている。同じ規格によれば6×7ロープの22.4mm径の場合の素線径は2.48mm、25mmでは2.78mmであり、Fig.2(c)とは明らかに異なった値を示している。したがって、切断荷重あるいはロープ直径の測定結果では、25mm径のロープに相当する値が得られたものもあったが、この素線径の測定結果から、全て24mmロープであるとみることが出来る。

3. 考 察

3.1 寿命値について

試験結果の寿命値の全体をみると、条件1の場合で8,500~18,500回、条件2の場合では6,900~14,700回の間にはばらついている。これら寿命値が正規分布をなすと仮定して、適合度を検定するとFig.3, Fig.4となる。真数正規分布あるいは対数正規分布のいずれにもよく適合しているが、対数正規分布とする方が

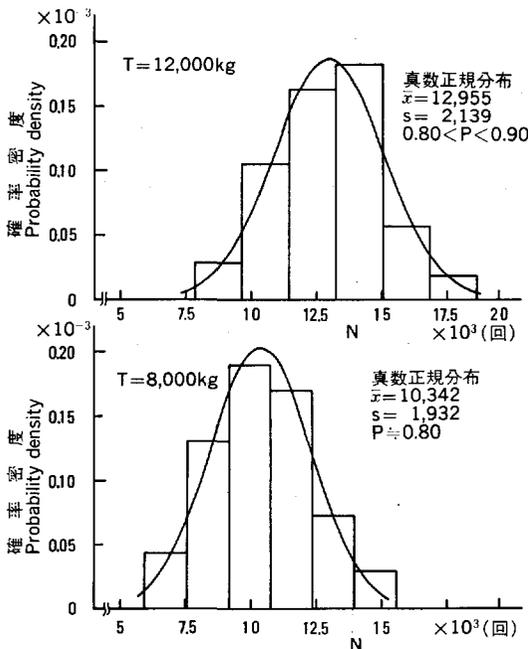


Fig. 3. 寿命値の分布 (真数正規分布)
Distribution of fatigue life.

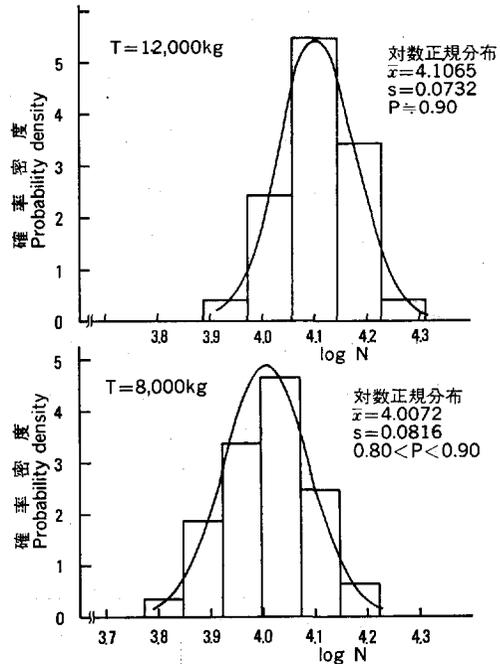


Fig. 4. 寿命値の分布 (対数正規分布)
Distribution of fatigue life (logarithmic normal distribution).

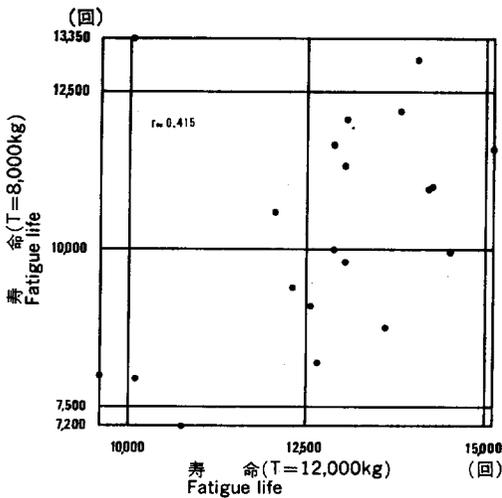


Fig. 5. 二つの条件における寿命の相関図
Relation between fatigue lives under two tensions.

少し適合性が高い。寿命値のばらつきの幅を示す指標として、標準偏差の平均値に対する割合すなわち変動係数で表すと、条件1では16.5%、条件2では18.7%である。この値は第2報⁵⁾にあるワイヤロープの各社性能比較試験の結果の寿命値より計算して求められる変動係数26~28%と比べるとはるかに小さい。両試験においては曲げ応力レベルが異なり、試験のくり返し数も異なるが、今回の試験の結果は比較的よくまとまったデータと見ることができる。

条件1と2における寿命の関係を Fig. 5 に示す。これは横軸に条件1における寿命値 N_1 を、縦軸に条件2における寿命値 N_2 をとった相関図である。ここでは各試料ごとに平均値で示している。 N_1 と N_2 の関係を相関係数 γ で

表わすと $\gamma = 0.415$ となる。相関係数が若干小さいと考えられるが、これは E-2 に特異な値があるため、これを除けば $\gamma = 0.694$ と高い値となる。A~F の各グループ別に N_1 と N_2 の相関係数をみると、E 以外では 0.57~0.91 と相当に高くなっている。条件1と2を最大曲げ応力で表すと 68.22 kg/mm^2 と 83.55 kg/mm^2 となるが、この程度の条件の差では寿命値の現れ方に著しい差がないとみられる。

ワイヤロープの寿命について、前報⁵⁾ の (6) 式では疲労試験の結果を S-N 曲線として表し、試験条件から計算される曲げ応力 σ_b とその時の寿命 N_n の関係を

$$N_n = \frac{3.7247 \times 10^7}{\sigma_b^{1.7184}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

としている。また同じ前報⁵⁾ の各社性能比較試験の結果を示す Fig. 7 から同様の式を計算すると、

$$N_m = \frac{4.9015 \times 10^8}{\sigma_b^{3.3490}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。

さらにワイヤロープの寸法効果をロープ径の逆比と仮定⁴⁾ すると今回の試験における寿命の推定値が求められる、この値と試験結果を対比することができる。

試験条件1および2について、それぞれの場合の曲げ応力 $\sigma_{b1} = 68.22 \text{ kg/mm}^2$ 、 $\sigma_{b2} = 83.55 \text{ kg/mm}^2$ を用いて (2) と (3) 式から求められる推定値 \hat{N}_{n1} 、 \hat{N}_{n2} および \hat{N}_{m1} 、 \hat{N}_{m2} を次表に示す。

	推 定 値		試 験 結 果
	(2) 式より	(3) 式より	
条 件 1	$\hat{N}_{n1} = 17,671$	$\hat{N}_{m1} = 16,084$	$\bar{N}_1 = 12,955$
条 件 2	$\hat{N}_{n2} = 12,479$	$\hat{N}_{m2} = 9,991$	$\bar{N}_2 = 10,342$

(2) 式は特定の1本の供試ロープの試験結果から導かれたものであり、(3) 式は多くのメーカーのロ

ープを供試ロープとしているが、(2)式による N_n は(3)式による N_m より大きな値を与えている。寿命値の傾向に差があるようにもみえるが、ここでは単なる結果の比較だけにとどめる。 N_n の式は曲げ応力が $50\sim 149 \text{ kg/mm}^2$ と広い範囲の疲れ試験結果によっている。これに対して N_m の式は $79\sim 136 \text{ kg/mm}^2$ 、今回の試験は 68.84 kg/mm^2 と 83.55 kg/mm^2 である。 N_m の式を N_n の式と比較するには応力の範囲がせますぎるし、 N_n と N_m の式に今回の試験結果をあてはめて式全体の適合性を調べるには、今回の試験条件が応力の低い方にのみかたよっている。さらに大きな σ_b に対する試験結果も必要である。また、寸法効果の表し方の不確実さもある。上述のとおり寿命を推定する場合にはロープ直径の逆比を仮定したが、寸法効果がどれほどであるかということは 24 mm 径ロープあるいはその他の径のロープについて広い範囲にわたって実験結果が求められた時に決まるものであろう。 24 mm 径ロープについても 16 mm 径ロープの場合と同じように、S-N 曲線をあてはめその形を決定するには、その目的のための試験が必要であり、今回の結果からだけでは不十分であると考ええる。

3.2 残留強さと残留エネルギー

寿命判定の基準を前述のように、1より長さの間に4本の素線断線が生じた時点としたため、寿命に達したワイヤロープは相当の引張り強さを残しており、その値は一定ではない。この残留強さの頻度分布図を Fig. 6 に示す。最小 $26 \times 10^8 \text{ kg}$ から最大 $36 \times 10^8 \text{ kg}$ までの比較的狭い範囲にまとまっており、平均値と標準偏差は、条件1ではそれぞれ 30.85×10^8 、 $2.13 \times 10^8 \text{ kg}$ であり、条件2では 30.28×10^8 、 $2.02 \times 10^8 \text{ kg}$ である。これら残留強さは各供試ロープの新品時の切断荷重に対して $70\sim 90\%$ の値を示している。

残留強さを寿命判定の直接的の要因とせず素線断線数による場合は、ワイヤロープ外観に現われる断線が少ないかあるいはまばらに分布する場合には、往復回数が増加し強さの低下が著しくなる。素線断線数による寿命判定の場合には、寿命値と残留強さの間に負の相関関係がみられることがある。本試験の結果の寿命と残留強さについてみると、相関係数は条件1で -0.221 、条件2では -0.207 である。Fig. 7 に相関図の一例を示す。とくに明瞭な相関関係は認められない。これは供試ロープの構成が 6×7 と単純で

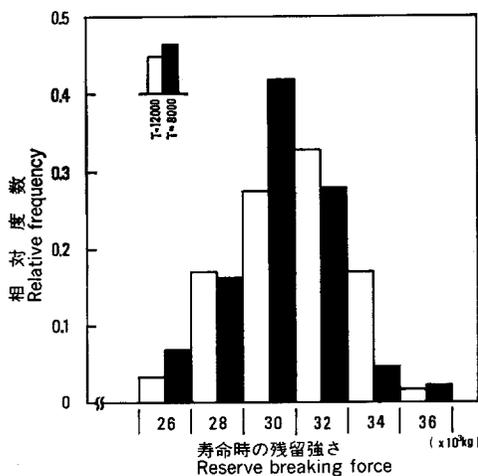


Fig. 6. 寿命時の残留強さ
Frequency of reserve breaking force.

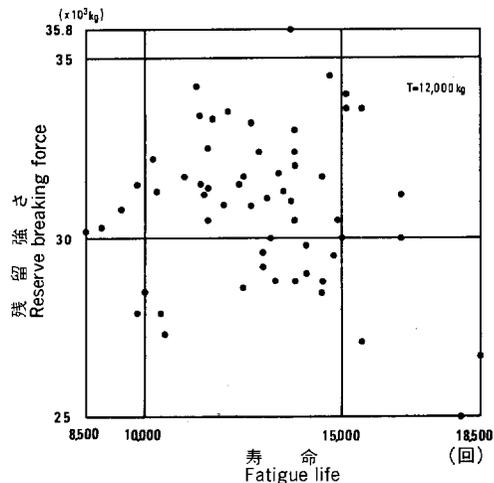


Fig. 7. 寿命と残留強さ
Relations between fatigue life and reserve breaking force.

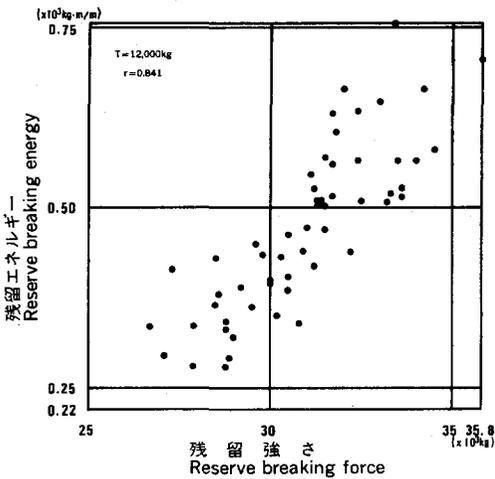


Fig. 8. 残留強さと残留エネルギー

Relation between reserve breaking force and reserve breaking energy.

切断試験におけるワイヤロープの荷重—伸び曲線が描く三角形が残留エネルギーであるから、弾性係数が同じと仮定すれば残留エネルギーは切断荷重の 2 乗に比例することになるが、Fig. 8 からもこの傾向がうかがえる。

残留エネルギーを新品時の切断エネルギーに対する比でみると、条件 1 では 19~53%、条件 2 では 16~50%、総平均で 31~35% である。寿命に達したワイヤロープは静的な引張り強さでは新品に比べて 70~90% の強さを保っているが、切断エネルギーでみるとその減少の程度はさらに大きい。これは疲れの進行とともにロープとしての伸びが小さくなり引張弾性係数が大きくなることによるが、架空線集材における主索として考えるときには、衝撃的な荷重の増加にどの程度まで耐えられるかという点で関係があることと思われる。切断試験の荷重—伸び曲線からの引張弾性係数の概略を求めてみると、新品時のおよそ 14,500~16,500 kg/mm² に対して疲れ試験後では 16,500~19,500 kg/mm² である。

3.3 素線断線の発生と経過

ワイヤロープにおける疲れ現象は、それを構成する素線の疲れがある程度以上進行した段階から、素線断線として外観に容易に認められるようになり次第に増加する。最初に現われる素線断線は初期断線と呼ばれ、ワイヤロープを使用する場合の保守点検にあたって、その疲れの進行過程を知るための一つの重要な指標である。

本試験における素線断線は、試験機の走行車輪が供試ワイヤロープと接する面に生ずる山断線がほとんど全てであり、谷断線は一つの供試ワイヤロープに 2 本みられただけであった。また同一ストランドの近接した位置で 3 本の素線断線を生じて寿命と見なされたもの 6 例のほかは、特異な断線はみられなかった。供試ワイヤロープの全長にわたって断線が発生する場合と、比較的短い範囲に現われる場合とでは、ワイヤロープの寿命値に差があるのではないかと考えられる。しかし試験結果をみると寿命に達した時点での素線断線の総数は 3~13 本であるのに対して、この値と寿命値との間に一定の関係は認められない。また条件 1 および 2 における素線断線の総数の平均は、供試ワイヤロープ 1 本当りそれぞれ 8.22 と 7.65 本であり、両者の間に統計的に有意な差はない。3 本の近接した素線断線によって寿命と判定された例は

素線数が少なく、断線が外部へ現われやすく、寿命に達したワイヤロープの残留強さに大きな差が生じなかったためと考えられる。

残留強さとともに寿命に達したワイヤロープの残留エネルギーも、疲れ現象の進行を示す重要な要因である。残留エネルギーの値は条件 1 では 0.220~0.756×10⁸ kg·m/m で平均値は 0.4676×10⁸ kg·m/m、条件 2 では 0.226~0.660×10⁸ kg·m/m で平均値は 0.4106×10⁸ kg·m/m である。これらの頻度分布図をつくってみると、残留強さの場合とよく似た形となる。残留エネルギーと残留強さの相関図を Fig. 8 に示す。図が示すようにこれら二つの測定値は高い相関関係にある。相関係数で示すと条件 1 では 0.841、条件 2

Fig. 9. 素線断線の増加
Increase of broken wires (total).

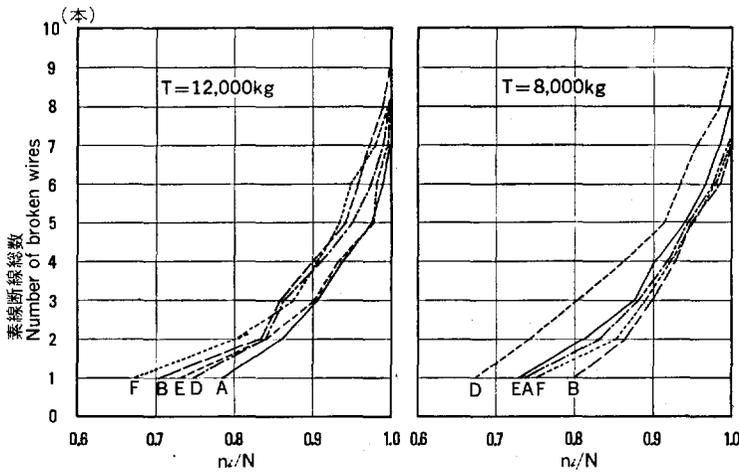
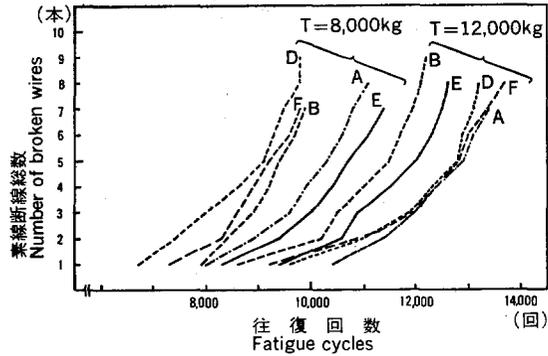


Fig. 10. 素線断線の増加
Increase of broken wires (total).

いずれも条件2の場合であった。

素線断線の増加経過が記録された99例から、総断線数すなわち供試ワイヤロープ全長に生じた断線の総数と、その時点までの往復回数の平均値の関係を Fig. 9 に、同様に総断線数と往復回数の寿命に対する比の関係を Fig. 10 に示す。初期断線の発生時期をみると、条件1では約9,600回であり、条件2では約7,500回である。この往復回数を寿命の平均値との比でみると、それぞれ0.741と0.735となる。条件2ではワイヤロープの張力が8,000 kg であり、条件1の12,000 kg に比べて小さく、曲げ応力は条件1の場合の $\sigma_{b1}=68.22 \text{ kg/mm}^2$ に対し $\sigma_{b2}=83.55 \text{ kg/mm}^2$ と大きい。したがって条件1に比べて条件2では初期断線の発生までの往復回数は小さく、寿命も短い。しかし、初期断線の発生とそれ以後の増加の傾向を、寿命に対する割合でみると、二つの条件下におけるいずれの場合にも同じような傾向を示している。各素線断線までの往復回数の平均値は当然ばらつきがみられるが、その変動係数は寿命値のそれとほぼ同程度であった。

断線発生の傾向⁶⁾についてみると、初期断線発生のおと引続いて比較的早期にかつ規則的に後続断線が生ずる“統出型”を示している。この型は滑車径と素線径の比が大きく曲げおよび引張り応力に対して素線抗張力に余裕のある場合にみられる不規則な断線発生である“断統型”と対称的である。今回の試験条

件が高応力レベルであることを断線傾向が特徴的に示しているとみることができる。

3.4 寿命について製造会社間の比較

この試験で対象とした 6×7 JIS 1号ワイヤロープは、全て JIS 認可工場の製品であり、ワイヤロープの構造も 7 本線 6 つよりという最も単純なものである。したがって製造会社による寿命の差は少ないであろうと考えられる。一方、単純に見えるワイヤロープもその製造には原料である線材の性質、焼入、表面処理、伸線、より線、製網と多くの工程があり、これら各工程における加工技術の良否が、ワイヤロープの耐疲労性を左右するともいわれる。そこで加工技術に関係する全てを総合した単位として製造会社を一つのグループとして、A～Fのグループ間に寿命の差があるか否かの検討を行った。ただし C については 1 例しかないので除外した。

A～Fの各グループごとに寿命値の平均とその標準偏差から変動係数を求め、平均値を縦軸に変動係数を横軸にとってプロットすると Fig. 11 となる。条件 1 と 2 のそれぞれについて縦軸と横軸の交点は、全体の平均値およびその変動係数を表わしている。条件ごとにみると寿命平均値の大小と変動係数の大小の相互関係がわかるが、この関係は二つの条件の場合に共通している点は少ない。たとえば条件 1 では F は寿命値が大で変動係数は小であるが、条件 2 の F は寿命値が最小となっている。他のグループについても同じ傾向にあるとはいえない。ただ、B の寿命値が小さく変動係数が大きいという点が共通してみられる程度である。

そこで、グループ間に寿命値の平均値と分散に統計的な差があるか否かの検定を行った。平均値の差はいずれの条件の場合にも統計的に有意な差とは認められない。分散については条件 1 の場合 F が他の全てより小さく、条件 2 では A と D、A と E、D と F、E と F の間に有意な差が認められ A と F は分散が小さく、D と E の分散が大きいといえる。

ワイヤロープの耐疲労性に影響を及ぼすであろうと思われる線径、型付率、より長さ等々、形状として計測できる要因の総合的なものとして、あるいは計測できない諸要因の複合されたものとして、製造会社

の比較を試みたが、ワイヤロープの疲れ試験の結果を製造会社というグループに分けた統計的な検定の結果からは寿命値の差は検出できず、一部に分散の差が認められただけであった。寿命の平均値について差がなかった点についてみると、グループ内での分散が比較的大きいことが目につく。これは試料ワイヤロープの収集が長い年月にわたったことから同一製造会社というグループの中でもいくつかの製造ロットが混ったことがこのような結果をもたらした原因の一つと考えられる。

1 本の 1 連のワイヤロープから多数のくり返し数の寿命試験を行ってその結果を他のものと比較すれば有意な差を検出できるかも知れないが、今回の試験方法ではグループ間に

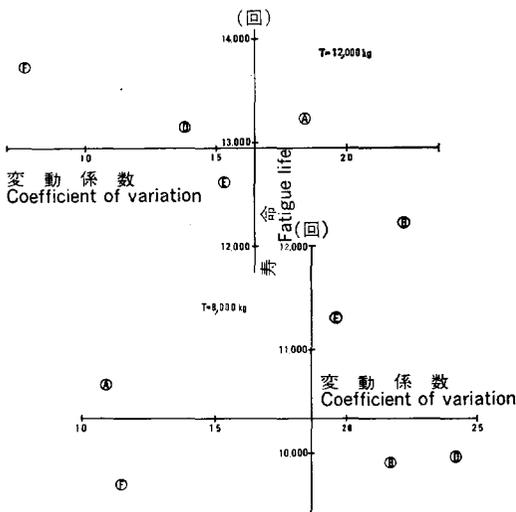


Fig. 11. 製造会社間の寿命比較
Comparison of fatigue life between manufacturers.

差があることを断定することはできなかった。このことから今回のワイヤロープの疲れ試験の結果は同一規格で同様の技術で作られているはずの同一製造会社のワイヤロープにも相当のばらつきがあること、あるいは簡単な構造であると思われる6×7ワイヤロープでさえも、製造の過程からある程度のばらつきはやむをえず生じることを示しているということができる。

本試験の結果についての考察は以上のとおりであるが、試験の計画段階ではもう一つのねらいがあった。それは実際に使われている多数の同種のワイヤロープを試料として疲れ試験を実施することにより、ワイヤロープの寿命に影響を及ぼす要因を見つけ出せるのではないかという期待であった。たとえば素線の増径率、型付率、より長さなどの測定結果から、疲れ寿命を推定すること、あるいは耐疲労性の優劣を比較することができないかという問題である。これが可能ならば、すぐれたワイヤロープの選択に際して役立つ情報となる。そこで、今回の試験結果である Table 1 に挙げた測定値およびそれにもとづく2次データにより、寿命との関係について統計的な分析を試みたが、寿命値の推定あるいは優劣の判別をする方法を見出すことはできなかった。今回の試験条件としては林業用架線の使用条件を表現しようとしたため、大きな引張り荷重と大きな横荷重(輪荷重)を設定した。このきびしい試験条件のため寿命(往復回数)そのものが10,000回前後と小さく、供試ワイヤロープが持つ性質や形状の差が寿命値の差として現われにくかったのではないかと考えられる。

今回の試験では施設あるいは時間的な制約から実施することができなかったが、寿命の推定を考えるならばワイヤロープの材質について化学的機械的な性質など、さらにくわしい調査が必要であろう。またワイヤそのものの性質がロープの疲れ寿命に大きな影響を与えるものであるから、ワイヤロープを構成するワイヤについての疲れ試験を行って、この結果からワイヤロープの寿命を推定するような方法も考えられるかもしれない。

む す び

林業用架空線集材装置の主索として用いられるワイヤロープのうち、6×7 24 mm (ワイヤロープ JIS 1号)を試料とした一連の疲れ試験と製品検査を実施した結果から、疲れ寿命とその分布、疲れ寿命に達したと判定された時点における残留強さ、疲れの進行にともなう素線断線の発生状況、製造会社間の耐疲労性の比較の各項目について考察した。林業用架線の使用条件を考慮した一定の試験条件のもとで行ったこの疲れ試験によって、6×7構成のワイヤロープの性質の一端を知り明らかにすることができたと考える。また、ここで得られた結果は、同様の目的に使われている他種類のワイヤロープについての試験結果と比較することにより、さらにこの種のワイヤロープの特徴が明らかになると思われる。

引用文献

- 1) 機械第1研究室・上松運輸宮林署ロープ試験室：林業用鋼索の疲労に関する研究(第3報)作業索(6×19, JIS 3号)の疲れ寿命試験, 林試研報, 300, 1~39, (1978)
- 2) ———— : 同上(第4報)作業索(6×Fi(25), JIS 12号)の疲れ寿命試験, 同上, 310, 49~72, (1980)
- 3) 上田 実・富永 貢 : 同上(第1報)作業索の繰返し引張り曲げ試験, 同上, 164, 79~135, (1964)
- 4) ———— : 集材機架空索の設計, 農林出版, 245 pp., (1967)
- 5) ————・斎藤敏彦・柴田順一 : 林業用鋼索の疲労に関する研究(第2報)主索に関する疲労試

験, 林試研報, 213, 1~71, (1968)

6) 上野 勲: 鋼索の疲労と断線, 第5回ワイヤロープ研究会講演集, 51~56, (1955)

Study on the Fatigue of Wire Rope for Logging (V)
Fatigue-life test of standing skyline (6×7, JIS No. 1)

Jun-ichi SHIBATA⁽¹⁾

Summary

In yarding operations with cable logging systems, the standing skyline is subjected to a severe condition which leads to fatigue failure. The main factor affecting the life of the ropes for the dynamic use is the repeated bending fatigue under tensile stresses.

The development of the wire rope fatigue testing machine and the results of the test investigating fatigue characteristics of standing skyline of cable logging systems were reported in the previous report, the Bulletin of the Government Forest Experiment Station No. 213 "Study on the Fatigue of the Wire Rope for Logging (II) Repeated tests of the main (skyline) rope under tension and bending".

This report presents the results of wire rope fatigue-life tests that were conducted using full-scale specimens of wire ropes with construction 6×7 C/L, 24 mm in diameter (6 strands of 7 wires each, with main core, bare steel wire, Lang's lay, composition oil, tensile strength of 165 kg/mm², breaking force specified of 34.9×10³ kg). This type of wire rope and the diameter of 24 mm is one of the most popular kinds of wire ropes being widely used for standing skylines in cable logging systems in Japan.

The fatigue testing machine was newly installed for the tests to increase capacity under the same idea that reported in the previous report mentioned above. The fatigue tests were carried out under two different conditions. One was 12,000 kg of tension of test wire ropes (case 1), and another 8,000 kg (case 2). The pitch diameter of two test sheaves were 150 mm, and the load upon them was 1,500 kg for both cases.

Tensile and maximum bending stresses which the specimens were subjected to were calculated at 56.73 and 68.22 kg/mm² for the case 1, and 37.82 and 83.55 kg/mm² for the case 2. The wire rope fatigue-life was expressed by the number of running sheave cycles before the time when the amount of broken wires on the test piece increased to a limit. The limit is called the maximum allowable number of broken wires. In these tests 4 broken wires in one length of lay of wire rope was adopted for the limit of 6×7 wire rope. In all, 31 wire ropes were tested, and altogether there were carried out 101 fatigue-life tests.

The results were summarized as follows:

1. The fatigue lives varied from 8,500 to 18,500 (case 1), from 6,900 to 14,700 (case 2). As an inspection of the distribution pattern of lives, the frequency distributions could be fitted

Received November 4, 1982

(1) Forest Mechanization Division

well by the normal distribution with the mean of 12,955 and the standard deviation of 2,140 for the case 1, and with the mean of 10,342 and the standard deviation of 1,933 for the case 2. Slightly better goodness-of-fit could be given when lives were transformed into logarithms.

2. The reserve breaking force of the wire ropes that had reached to the maximum allowable number of broken wires (at the end of its life) varied from 25.0 to 35.8×10^8 kg, the average being 30.85×10^8 kg for the case 1, and 25.7 to 35.0×10^8 kg, the average being 30.20×10^8 kg for the case 2. They were equivalent to 70-90 per cent of the breaking force of new one. Also reserve breaking energies calculated from stress-strain curves were 0.220-0.756 $\times 10^8$ kg·m/m, the average being 0.4676×10^8 kg·m/m for the case 1, and 0.220-0.660 $\times 10^8$ kg·m/m, the average being 0.4106×10^8 kg·m/m. for the case 2 they were equivalent to 19-53 per cent of new one.

3. The tendency of the growth of the number of broken wires was observed. On the average the first broken wire occurred at the point of about 75 per cent of the wire rope fatigue lives.

4. No significant differences in fatigue lives between manufacturers' wire ropes tested were confirmed.