

鋼索の疲労と安全率について

山 本 誠

(農学部林業工学研究室)

Study on the Fatigue and Safty Factor of the Wire Rope for Logging Cableway

Makoto YAMAMOTO

(Laboratory of Forestry Engineering, Faculty of Agriculture)

The deterioration of wire rope is the result of repeated use under tensions and bendings.

In the wire rope of 6×19 , the snapping of the first wire up to the third occurs in linier proportion to the number of use. However, it increases with a gradual convex curve thereafter.

From the conducted experiments, it was found that the snapping of the first wire occurs, in average, at 55~65% of the announced durability, and the second wire at 65~70%.

Snapping of wire tends to occur irregularly as the wire rope fatigues more and more, and because of it, it may be more desirable if the standard of the durability of wire ropé is calculated based of the number of use, or the number of hours in use.

The safety factor σ as calculated from the fatigue of wire rope is found to become largest when the simple safety fact or Nt is 3.

The safty factor σ , considered in terms of the fatigue of wire rope, is greater (meaning that the durability is longer) with wire rope having larger diameter, even though $Nt=3$.

はじめに

鋼索は使用にともなう漸次その強度が劣化して、遂には使用不能となる。この劣化現象には鋼索の内面的なものと同外的なものがある。内面的なものには鋼索の鋼材組織の変化によるもの、外面的なものには、変形、素線の断線、摩耗等がある。これらの現象による鋼索の寿命の判定法としては、電磁探傷法¹⁾、超音波探傷法²⁾、アイソトープによる非破壊試験法³⁾等⁴⁾があるが、いずれも鋼索の寿命を直接的に判定することはできない。一般的な鋼索の寿命判定基準としては、肉眼的観測による素線の断線をもっておこなうのが通例である。林業用索線については、労働安全衛生規則によって、摩耗による直径の減少が公称径の7%をこえるもの、鋼索の一撚の間において素線の $\frac{1}{3}$ 以上が切断したもの、あるいは形崩れ、腐蝕の著しいものは使用してはならないという基準が設けられている。しかしながら鋼材の組織の物理的変化にともなう疲労については、何の基準も与えられていない。

鋼索の劣化により素線の断線が始まり、次第に断線が進む状況については二、三の研究報告⁵⁾⁶⁾があるのみで、その過程、様相は明らかにされていない。今回は集運材作業の動索として最も多く使われている19本線6撚の鋼索を材料として、鋼索の疲労の現象を考究するため鋼索疲労試験をおこなった。

また、再三にわたる断線事故にかんがみ、軌索の疲労よりみた安全率について理論的に考察した。

材料および方法

疲労試験に供した鋼索は19本線6撚、2種(旧規格)公称径12mm、鋼索疲労試験機は高知大学林業工学研究室で設計したものによった(写真1参照)。装置は、鋼索の反復運動を往復式とし、

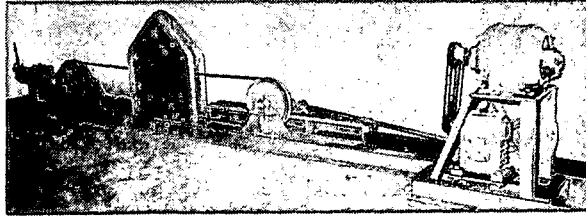


Photo. 1 Fatigue-testing machine

索速を 0.2~4.7 m/sec とし、索張力を 0.5 t と 1.0 t の 2 通りとした。また疲労試験機の 3 個の鑄鋼製シーブによって 2 重の S 曲げ、および引っぱりの疲労を起こさせた。3 個のシーブの直径は 182 mm と 305 mm の 2 組について、以上の条件で鋼索が切斷するまでくり返し試験をした。

結果と考察

I. 断線発生の過程

図-1は、くり返し疲労試験機で索張力 1.0 t での実験結果である。

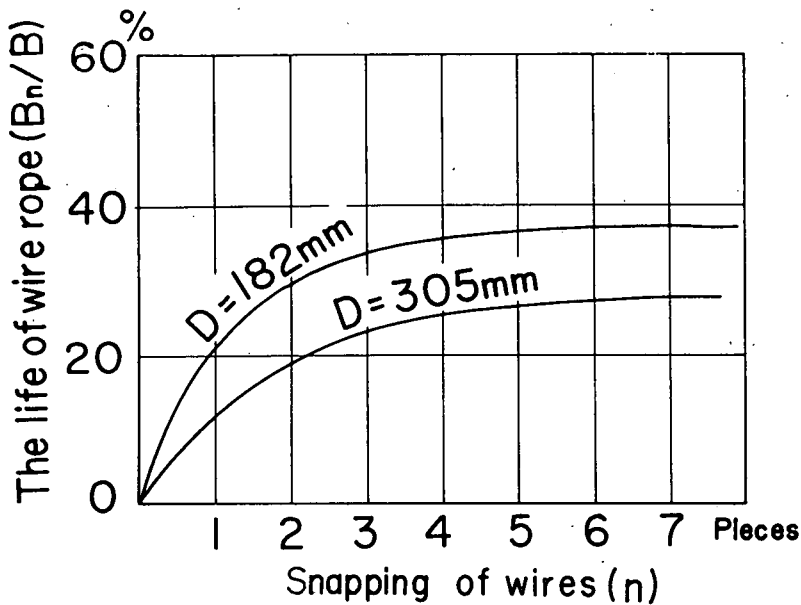


Fig. 1 Relation between the life span of wire rope and snapping

ここに B …… 使用不能の状態に至ったときのくり返し曲げ回数

B_n …… 第 n 番目の断線を生じたときのくり返し曲げ回数

横軸の n は、第 n 番目の断線を示す。したがって図-1は第 n 番目の断線は使用不能な状態になったときのくり返し曲げ回数、すなわち寿命の何%のところで断線が発生したかを示すものである。図中 D はシーブの直径を示し、同一直径においてはほとんど同一の傾向を示している。すなわち第1断線 ($n=1$) の発生は $D=182$ mm の場合、約25% $\left(\frac{B_1}{B}\right)$ 付近を示し、第2断線以後は緩やかな進行を示す。これはつまり、この場合第1番目の断線は寿命の25%のところで発生すること

を意味している。

図-2は、(6×19)旧規格2種のφ12mm鋼索についての同様の実験結果で引張応力 σ_t (kg/cm²)を示している。条件の違いによって多少の差はあるが、その傾向はほぼ図-1に似ている。ただ断線の第1番目が起こる時期は寿命の30~40%のところにある。

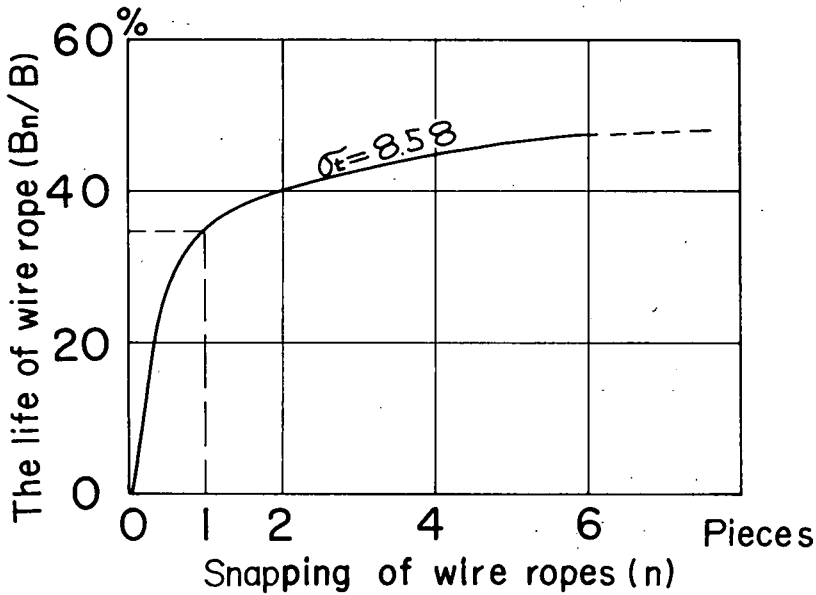


Fig. 2 Decline in tension stress

II. 索線断線と破断力

1) 鋼索の耐用度

鋼索の疲労劣化にともない索線の断線が発生し、それにしたがって鋼索の破断力が低下する。こ

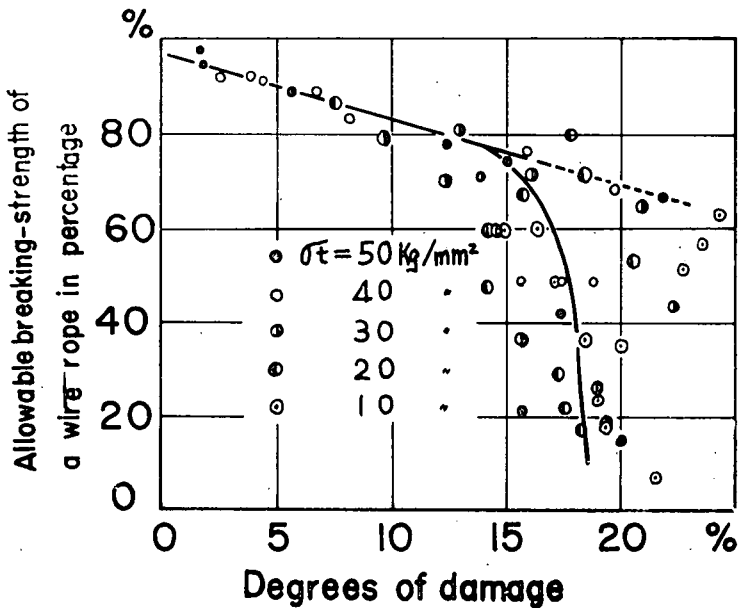


Fig. 3 Durability of a wire rope

の素線の断線数と破断力低下との関係については、ほとんどの条件下で直線的傾向を示す^(6),7)。しかし図-3に見るように約20%の保証破断力の低下以後は、この関係が直線的にならず、極めて薄い密度で分散する。これ等の測定値が分散する状態は、常識的には考えられないことである。すなわち鋼材部材の応力に、かようなばらつきがあることは、材質の不良、あるいは使用条件の相異による疲労度の相異ということになる。この場合は後者の理由によるものであろうが、いずれにしろ鋼索の使用にあたっては可成の不安定さを感じさせられる。したがって、全く使用に耐えなくなった状態、すなわち子細の1本が完全に破断した状態をもって寿命とすることは、はなはだ不安定であって合理的でない、そこで、図-3より13%の損耗度の点を寿命と見るのがよからう。

2) 断線数と破断力

同上の(6×19) 12 mmの鋼索について、疲労試験後、素線断線数と破断力との関係を調べた結果を図-4に示した。図-3の素線の断線数と破断力の傾向に似て、一応直線的な関係を示すが断線数の増加にともない不安定となり、ばらついてくる。

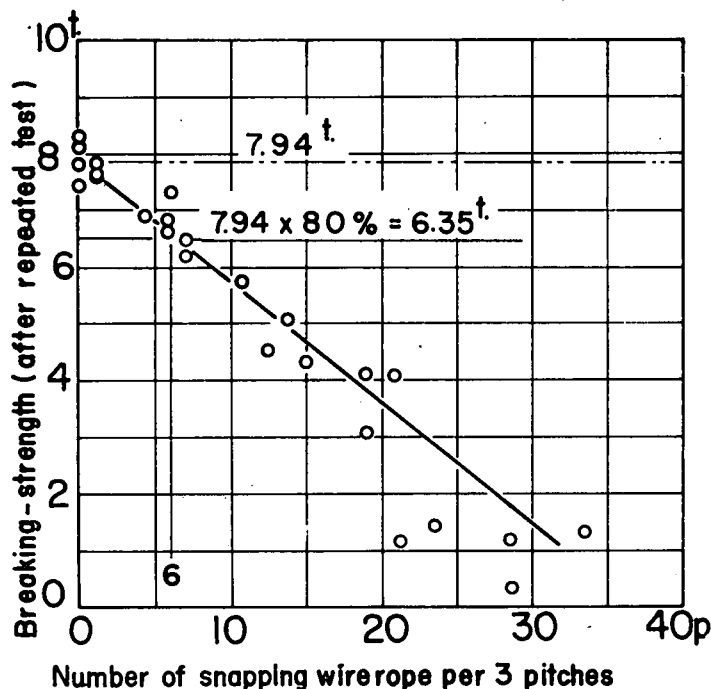


Fig. 4 Relations between snapping of wire and breaking-strength

これらのことから保証破断力の約20%減の断線数をもって実験上の耐用限度と仮定した。すなわち、使用不能の状態に至ったときのくり返し曲げ回数 B に対して、1ピッチ当り2本目の断線を生じたときのくり返し曲げ回数 B_2 をもって耐用限度と仮定した。

III. 断線発生傾向

(6×19), c/o, 12 mm, 素線径 0.82 mm の試料によって、 B_n/B — n の関係を図-5に示した。試験は、張力 1.0 t で、シーブ径を 182 mm のものと、305 mm のものでおこなった。なおこの D/δ はそれぞれ ≈ 220 倍、 ≈ 380 倍である。

図-5によると、第1番目の断線は、ほぼ耐用限度の55~65%、第2番目の断線は65~70%で生じ、以後はなだらかな曲線をえがく。この図は、断線が始まることはくり返し曲げの耐用限度に達していることを示し、第2番目の断線の発生時点では、第1番目の断線時に比較して急激な破断力

減をきたしている。また、第1番目断線の発生時のくり返し回数の2倍にも疲労が進むと、もはや安全率は期待できなくなる。このことを裏面より述べれば安全率を高める事だけが必ずしも断線を阻止し得ることではないということになる。そこで安全率、特に鋼索の疲労より考えた安全率について理論的に考究してみる。

IV. 鋼索の疲労と安全率

1) 疲労より見た安全率

索線に働らく種々の応力を詳細に考慮して正確に取扱うことは、はなはだ複雑なことで不可能に近い。今回は索線に働らく二大応力、すなわち引張応力 σ_t 、曲げ応力 σ_b のみが働らくものと仮定する。

疲労を表示するのに最大応力 σ_{max} 、最小応力 σ_{min} 、平均応力 σ_{mean} を使用するとすれば、図-6 のように表わすことができる⁸⁾。

索の下側の素線では σ_b は負、上側では σ_b は正の値を取る。ここでは一応、下側について考える。いま索線の safety range が図-6 の ABC, A'B'C' の間にあるとすれば、ある σ_{mean} に対する応力振幅は σ_r である。そしてこれは実際に生ずる応力変動の許容極限值である。

次に実験に供した鋼索の下側の素線の応力についてみる、この素線の平均応力が上述の σ_{mean} に等しいとする。いま索の引張応力を σ_t 、断面積を A、索の張力を T とすると

$$\sigma_{min} = \frac{T}{A}$$

索の実質的な破断断率を η 、素線が実際にうける引張応力を σ_{max}' 、 σ_{min}' とすると

$$\sigma_{max}' = \frac{\sigma_t}{\eta}, \quad \sigma_{min}' = \frac{\sigma_t}{\eta} - \sigma_b$$

σ_{max}' 、 σ_{min}' は図-6 の B、B' 間にある。よって理論的には safety range 内にあるので一応安全限界内にあるといえる。この場合の素線の応力変動の幅を表わすと

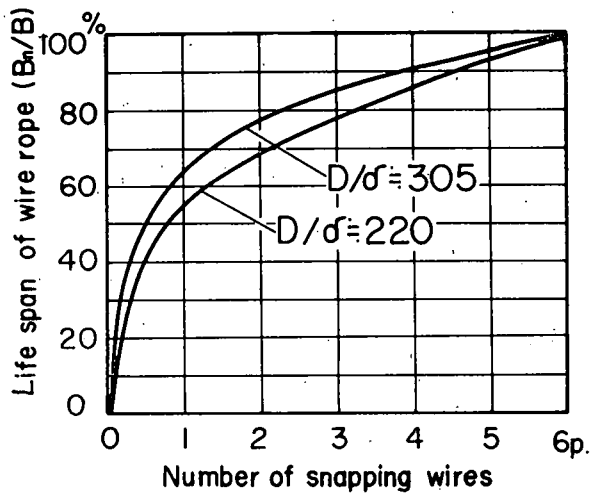


Fig. 5 Tendency of snapping

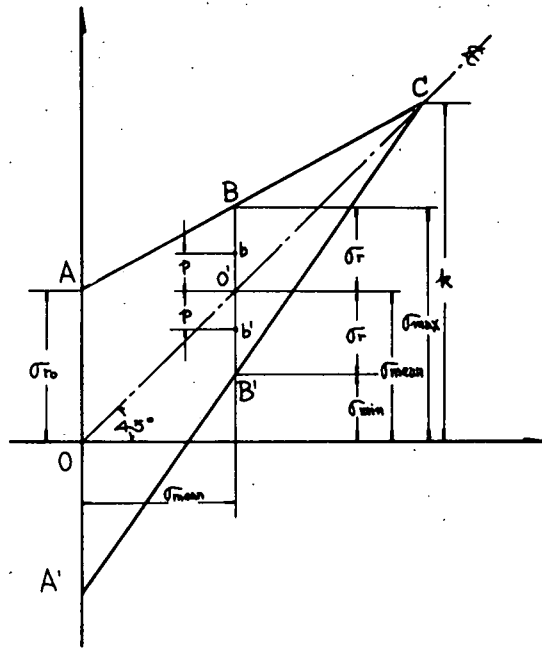


Fig. 6 Symbolic diagram of bending stress

$$\frac{O'B}{O'b} = \frac{\sigma_r}{p} = \sigma$$

これを仮りに疲労の安全率と呼ぶ。

2) 疲労の安全率 σ

もし安全率 σ に極大値が存在するならば、その極大値の条件で使用することが望ましい。そこで以下のように考えた。

$$\sigma_b = \frac{Q}{4} \cdot \delta \sqrt{\frac{kE}{J \cdot T}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

- 但し、 Q : 単荷重
 kE : 索の弾性率
 T : 索の張力
 δ : 索線径
 J : 索の断面二次モーメント

つぎに索の破断力を Z で表わし、張力のみを考慮した索の安全率を Nt であらわす。すなわち

$$T = \frac{Z}{Nt} \text{ であることから}$$

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_t}{\eta} = \frac{T}{\eta A} = \frac{1 \cdot Z}{\eta A \cdot Nt} = \frac{Z}{\eta A} Nt^{-1} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\sigma_b = Q \sqrt{\frac{kE}{TA}} = Q \sqrt{\frac{kE}{\frac{Z}{Nt} \cdot A}} = Q \sqrt{\frac{kE}{A \cdot Z}} Nt^{\frac{1}{2}} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\sigma_{mean} = \sigma_{max} - \frac{\sigma_b}{2} = \frac{Z}{\eta A} Nt^{-1} - \frac{1}{2} Q \sqrt{\frac{kE}{A \cdot Z}} Nt^{\frac{1}{2}} \quad \dots \dots \dots (4)$$

つぎに σ_r は、 $\frac{\sigma_r}{\sigma_{ro}} = \frac{k - \sigma_{mean}}{k}$

$$\therefore \sigma_r = \frac{\sigma_{ro}}{k} (k - \sigma_{mean}) = \frac{\sigma_{ro}}{k} \left(k - \frac{Z}{\eta A} Nt^{-1} + \frac{1}{2} Q \sqrt{\frac{kE}{AZ}} Nt^{\frac{1}{2}} \right)$$

疲労安全率 σ は

$$\sigma = \frac{\sigma_r}{p} = \frac{\sigma_r}{\frac{\sigma_b}{2}} = \frac{2\sigma_{ro}}{k} \left(\frac{k}{Q \sqrt{\frac{kE}{AZ}}} Nt^{-2} - \frac{\frac{Z}{\eta A}}{Q \sqrt{\frac{kE}{AZ}}} Nt^{-\frac{3}{2}} + \frac{1}{2} \right)$$

この σ は安全率 Nt の関数で、その極値は

$$\frac{d\sigma}{dNt} = \frac{2\sigma_{ro}}{k} \left(-\frac{1}{2} \frac{k}{Q \sqrt{\frac{kE}{AZ}}} Nt^{-\frac{3}{2}} + \frac{3}{2} \frac{\frac{Z}{\eta A}}{Q \sqrt{\frac{kE}{AZ}}} Nt^{-\frac{5}{2}} \right) = 0$$

$$3 Q \sqrt{\frac{kE}{AZ}} Nt^{-\frac{5}{2}} = k Nt^{-\frac{3}{2}}$$

$$Nt = 3 \frac{\frac{Z}{\eta A}}{k} \quad \frac{Z}{\eta A} = k \text{ ならば}$$

$$Nt = 3$$

$$\frac{d^2\sigma}{dNt^2} = \frac{2\sigma_{ro}}{k} \left(\frac{3}{4} \frac{k}{Q\sqrt{\frac{kE}{AZ}}} Nt^{-\frac{5}{2}} - \frac{15}{4} \frac{\frac{Z}{\eta A}}{Q\sqrt{\frac{kE}{AZ}}} Nt^{-\frac{7}{2}} \right)$$

$$= \frac{2\sigma_{ro}}{k} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{Nt^{-\frac{5}{2}}}{Q\sqrt{\frac{kE}{AZ}}} \left(k - 5 \frac{Z}{\eta A} Nt^{-1} \right)$$

$$\frac{Z}{\eta A} = k \quad \text{なれば}$$

$$\therefore \frac{d^2\sigma}{dNt^2} = \frac{3}{2} \frac{\sigma_{ro}}{Q\sqrt{\frac{kE}{AZ}}} Nt^{-\frac{5}{2}} (1 - 5Nt^{-1})$$

$Nt=3$ とすれば

$$\frac{d^2\sigma}{dNt^2} = \frac{3}{2} \frac{\sigma_{ro}}{Q\sqrt{\frac{kE}{AZ}}} \cdot \sqrt{3^5} \left(1 - \frac{5}{3} \right) < 0$$

$\therefore \sigma$ は $Nt=3$ で極大値をとる。

疲労の安全率 σ は、通常の単純安全率 $Nt=3$ のとき極大値を示すことが分る。すなわち鋼索の疲労を裏面的に見れば、安全率 $Nt>3$ は、左程の意味がない結果を意味する。また同じ安全率 Nt でも鋼索の太さによるものの方が、索張力比の調整によるものより大きな σ を得ることができ。

要 約

鋼索の強度の劣化は、くり返しの引張曲げによる疲労によっておこる。(6×19) c/o の鋼索においては、第1番目、第2番目、第3番目までの断線発生の時期は、くり返し回数に関して直線的に発生する。しかしそれ以後の断線はゆるやかな上に凸の曲線をえがく。

それぞれ耐用度の55~65%、65~70%で発生する。そこで耐用度の基準は、鋼索の疲労が進むにつれて素線断線の発生が不規則となることから、くり返し回数、すなわち使用時間に基準を置くのがよからう。また鋼索の疲労より考えた安全率 σ は、単純な安全率 Nt が3のとき極大値を示すことがわかった。また鋼索の疲労を加味した安全率を考える場合は $Nt=3$ の場合でも直径の大きい鋼索を使って得た安全率のものの方が疲労に関する安全率 σ が有利となる。

引 用 文 献

- 1) 村山茂明：ワイヤロープの電磁探傷に関する研究，宇大，農，学術報告特輯 24 1968
- 2) 秋鹿為之：超音波探傷について，三菱電気研究報告 1066 1963
- 3) 鈴木 光：ワイヤロープの電磁的ならびにアイソトープによる非破壊検査法について，ワイヤロープ研究会講演集 6，1965
- 4) 川田鉄五郎：金属材料の顕微鏡的観察 IV：金属学会誌 44，274~281，1953
- 5) OGAWA, T., SUZUKI, S.: A New Index to Control Cable Dndurance, The Aeronautica Research Institute, 1949

- 6) 上野 勲：鋼索の疲労と断線，ワイヤロープ研究会講演集 5， 1965
- 7) Wörnle, J. : Ein Beitrag zur Klärung der Drahtseilfrage, V. D. I-Zeitschrift, 425~431, 1959
- 8) 新保赴夫：安全率に関する考察について，ワイヤロープ研究会講演集 5， 101~114， 1965

(昭和45年 9月24日受理)