

4. 素線断線損傷の進行特性について*

田中正清**

4. Analysis of Progression Properties of Wire Breaking Damage*

by Masazumi TANAKA**

Abstract: To decide the reasonable inspection period and to improve the quality of safety management for crane wire ropes, it is inevitable to predict reliable fatigue life under well known working conditions and moreover to grasp the progression properties of wire breaking damage. However, so far the fatigue life of wire ropes has been assessed in many cases practically by the number of load repetitions until the number of visible wire breaking detectable by external observation reaches a specific number. And the case of the fatigue life assessment which takes the internal damages especially interested in this specific study into consideration or the study on the progression properties of all wire breaking patterns including internal wire breaking have not been found.

In this study, therefore, S-bending fatigue tests was carried out and the quantitative expression of increasing behavior of wire breaking numbers for one kind of the IWRC wire ropes (IWRC 6×Fi(29)) previously studied in Chapter 3.

The main results obtained are as follows.

- (1) In both cases of $D/d = 16$ and 12.8 (D : sheave diameter, d : rope diameter), the preference of internal wire breaking in progression property through all life does not change, and therefore, the ratio of internal wire breaking is larger in the early stage than in the later stage.
- (2) The dependence of the maximum number of visible wire breaking $C_{v\max}$ on the number of the repetition of S-bending N is approximated by following formula.

$$C_{v\max} = A \cdot N^m$$

here, A and m are constants, being 8.81×10^{-21} and 5.61 respectively for $D/d = 16$, and 1.66×10^{-17} and 5.61 respectively for $D/d = 12.8$. The influence of D/d is larger for the coefficient A .

- (3) For $D/d = 16$, the dependence of the maximum of total external wire breaking numbers of strands $C_{0\max}$ and the the maximum of total wire breaking number of the strands $C_{t\max}$ on N is approximated by the following formula.

$$C_{0\max} = 3.68 \times 10^{-15} \cdot N^{4.25}$$

$$C_{t\max} = 1.03 \times 10^{-13} \cdot N^{3.88}$$

- (4) For $D/d = 16$, $C_{t\max}$ is given by the following expression, as a function of the maximum of the visible wire breaking number $C_{v\max}$.

$$C_{t\max} = 7.3 C_{v\max}^{0.69}$$

* 本報は日本材料学会の“材料”に投稿した論文¹⁾を補筆・修正したものである。

** 機械システム安全研究部 Mechanical and System Safety Research Division

This kind of formula are thought to be very useful, when studying the damaging state of wire rope including the internal ones.

Keywords; Wire rope, Fatigue life, Fracture, Wire breaking, Internal damage

1. 緒 言

クレーン等の荷役作業に使用される機械・構造要素にかかる荷重は大なり小なり変化するのが常であり、これらの要素の使用壽命（使用回数、使用期間）を予め設定あるいは予測することは元々非常に困難な場合が多い。とくにこれらの作業に使用されるワイヤロープの場合、他の機械・構造要素と異なり、多くの素線をより合わせた複合構造を有する要素であるためその困難はさらに増加する。

従って、結局ワイヤロープにおいても、類似条件で使用されるほかの機械要素などと同様に、かなりゆとりのある短めの期間ごとに損傷状態をチェックして、危険な状態になる前に使用を停止することによって安全を確保する方法が採られている^{2),3)}。

その場合、より合理的な検査期間の設定などの安全管理の質の向上のためには、既知の使用条件下での正確な寿命の把握、さらには損傷の進行特性の把握が不可欠となる。しかし、従来のワイヤロープの寿命評価試験の多くは、外観検査で検出可能ないわゆる可視断線数が一定数に達するまでの荷重繰返し数で評価されているのが実状であって、本特別研究でとくに注目している内部断線⁴⁾を含めた寿命評価の例、さらには内部断線を含めた全ての断線損傷の進行特性を検討した例は調査した範囲では発見できなかった。

そこで本研究では、IWRC ワイヤロープを安全に使用するために検討すべき対象の一つとして、前章で検討したワイヤロープのうちの1種で、現在国内のクレーン用の移動ロープとして最も多く使用されているワイヤロープを対象にS曲げ疲労試験を実施し、内部断線を含めた全体的な素線断線の増加挙動を定量的に表示することを試みた。

2. 実験方法

2.1 供試ワイヤロープ

本研究に用いたワイヤロープは前章での実験に用いたものと同じの市販のIWRC 6× Fi(29)で、o/oタイプ（普通Zより、赤グリース、裸）B種、16 mmφで、その断面構成はFig. 1に示すとおりである。このワイヤロープはフィラー形で（同図中の δ_2 がフィラー線）

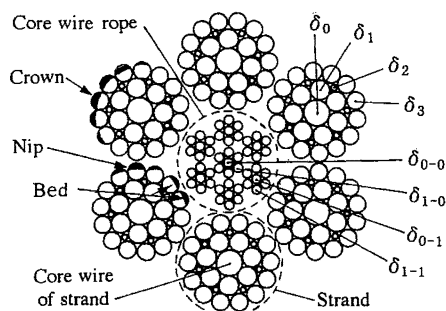


Fig. 1 Construction of test wire rope (IWRC 6× Fi(29))
供試ワイヤロープの断面構成

柔軟性、耐疲労性、耐摩耗性が良いとされ、クレーンのジブ起伏および巻上げロープなどに幅広く使用されている。その破断荷重は173 kNである。

ロープおよびストランドのピッチ、素線の熱処理状態および素線材の化学成分などの詳細については前章を参照されたい。

2.2 試験装置⁵⁾

試験装置は前章で使用したものと同じで、本体フレーム、駆動シーブ部、試験シーブ部、緊張シーブ部、制御部から構成され、ワイヤロープに一定の張力を与えた状態で試験シーブを約2mのストロークにて往復動させることによってワイヤロープに繰返し曲げを与える装置である。試験シーブの詳細についても前章と全く同じである。

2.3 試験条件

シーブのピッチ円（シーブbに掛かるロープの中心が描く円）の直径 D とロープ直径 d の比 D/d を、実用上広く使用されている16の場合と、許容されていない12.8の場合の2種類に変えたS曲げ疲労試験を実施した。S曲げ状態は前章で示したように試験部の2つのシーブで180°折り返し、中間の直線部長さはシーブ径と同じとした。試験中はロープ軸方向に許容使用荷重に相当する一定の張力（ロープの公称破断荷重の1/5に当たる34.6 kN）を負荷し、繰返し速度は10 cpmとした。なお、本報では便宜上ロープの往復動の繰返し数を単に繰返し数と呼ぶ。

2.4 断線数の測定

(1) 可視断線数

まず1ロープピッチ（以下単にピッチ）当たりストランド素線総数の10%（13本）の目視可能な素線断線（以下可視断線）が生じるまでの繰返し数 N_e （以下10%断線寿命）を求めた。次にS曲げ疲労試験の途中で N_e の50%, 75%, 90%および N_e の繰返し数およびそれらの間の数ヶ所において試験を中止し、緊張力は保持したままで、試験ロープの中央部の曲げを受ける20ロープピッチについて、目視によって1ピッチごとの素線断線数（以下断線数）を数え可視断線数として記録した。それぞれのピッチには、ロープ中心位置から左側にL1~L10、右側にR1~R10の番号を付けた。

(2) 実素線断線数

N_e の50%, 75%, 90%および N_e の繰返し数で疲労試験を打ち切ったロープについて、上記のL1~L10の範囲を1ピッチごとに切断し、ロープを各々の素線にまで分解し、6本のストランドのそれぞれについて、素線の種類および素線位置（外層素線の山部：crown, 谷部：nip および底部：bed, および内層素線と心素線）別に素線断線数を数えた。これを実素線断線数と呼ぶことにする。なお、前章と同様、心ロープの断線については検討対象としなかった。

3. 実験結果

3.1 可視断線の増加特性

曲げ疲労試験を途中で停止し、それぞれのピッチで観察される可視断線数 C_v と繰返し数 N との関係を求めた例を $D/d = 16$ および 12.8 の両条件に対してそれぞれ Fig. 2 および Fig. 3 に示す。Fig. 2 は断線数が最大で22本/ピッチになった $N = 6150$ cycleでの、また Fig. 3 は $N = 3608$ cycle で完全に破断した試験ロープについてのデータである。いずれも、一回の往復動で 180° 曲げを完全に4回受けるロープ中心部付近での断線の進行が早いので、両図では、中央部のL5からR5までの10ピッチのデータを採用している。 D/d が小さいほどより小さい繰返し数から可視断線が生じ、それに伴って寿命も短くなっている。

また、各繰返し数での可視断線数の最大値 $C_{v,max}$ （同一ピッチとは限らない）に着目し、それと繰返し数 N との関係を求めた結果を Fig. 4 に示す。7本のうちから損傷の進んだ3本の試験片のデータを採用したが、他の試験片とのばらつきは非常に少なかった。同図の結果によると、可視断線は D/d の大小に拘わらず寿命の6割の辺りで発生し、寿命の9割前後でストラン

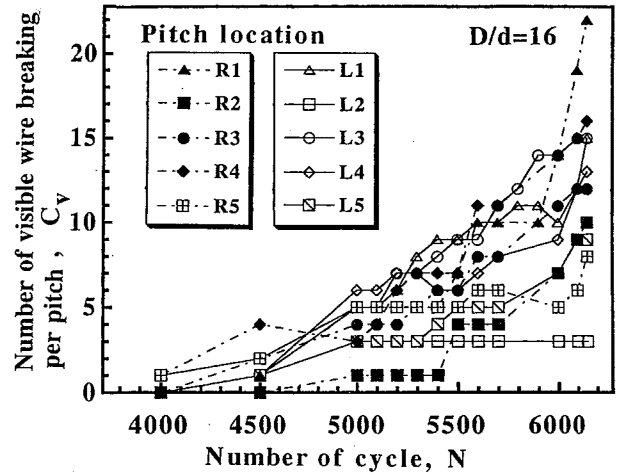


Fig. 2 Relation between repeated cycle and number of visible wire breaking for $D/d = 16$
可視断線数とS曲げ繰返し数の関係

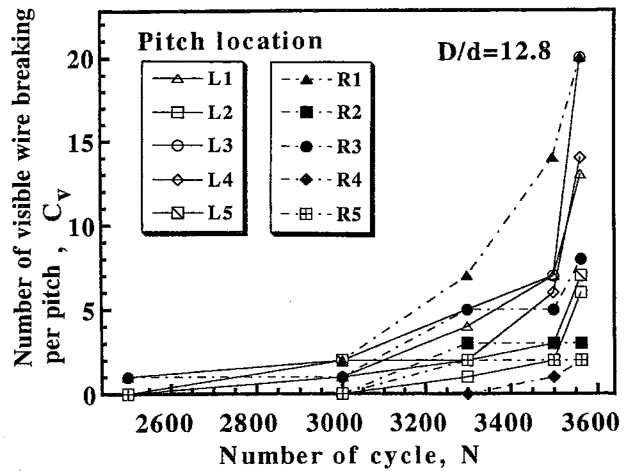


Fig. 3 Relation between repeated cycle and number of visible wire breaking for $D/d = 12.8$
可視断線数とS曲げ繰返し数の関係

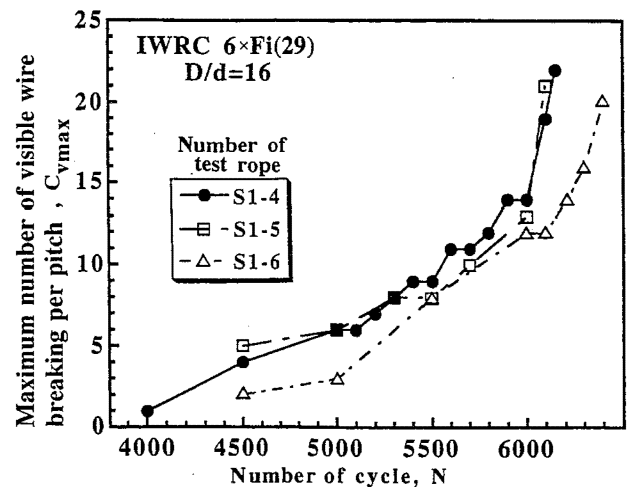
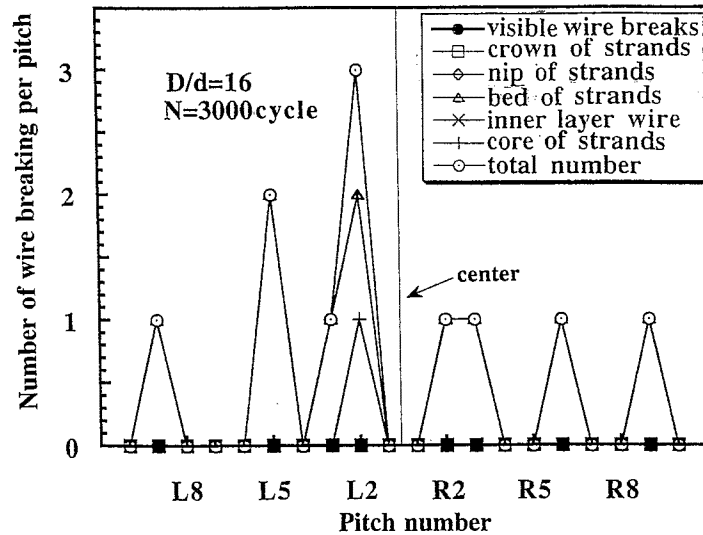
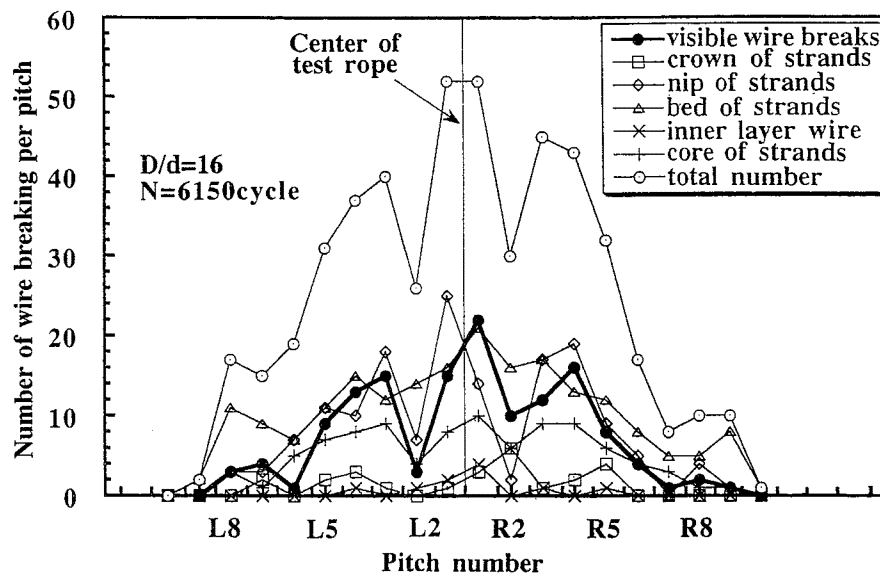


Fig. 4 Relation between the maximum number of visible wire breaking and repeated cycle
可視断線数最大値とS曲げ繰返し数の関係



(a) $N = 3000$ cycle



(b) $N = 6150$ cycle

Fig. 5 Influence of S-bending number on the distribution of wire breaking at various structural positions for $D/d = 16$
位置別素線断線数分布状態への繰返し数の影響

ド素線本数 132 本の約 10% に達してから急激にその数を増してロープ破断に至っている。

3.2 ストランドの実素線断線の増加特性

1 ピッチごとにロープを分解してストランドの実素線断線数を調べた結果の例を、 $D/d = 16$ の 50% N_e のまだ損傷の少ない場合について Fig. 5(a) に、またかなり損傷の進行した N_e の場合について同図 (b) に示す。

これらの結果から、 $D/d = 16$ 、定格荷重相当張力下の S 曲げ疲労による断線損傷は、全寿命にわたって外部より内部（外層素線の底部、内層素線および心素線）

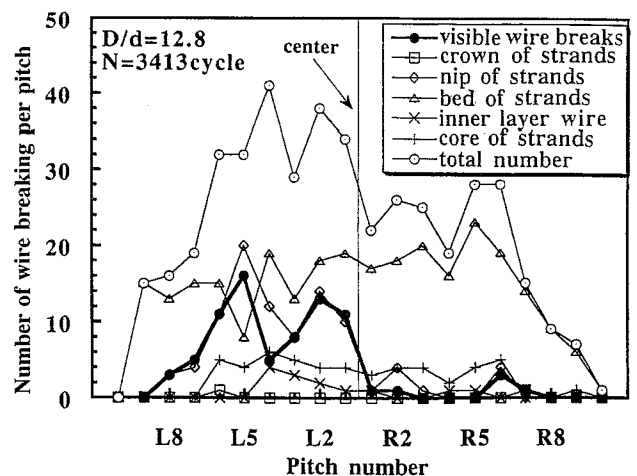


Fig. 6 Example of the distribution of wire breaking at various structural positions for $D/d = 16$
 $D/d = 16$ における位置別素線断線数分布状態

の方が多いが、損傷が内部の方から始まっているため、後期よりも初期の方が内部損傷の割合は大きく、疲労の段階によってその割合は変化することが分かる。

Fig. 6 は $D/d = 12.8$ の場合に対しての同様の結果の例を示している。

なお、外層の山部および谷部での断線数の合計は可視断線数とほぼ一致しているため、両位置での断線は目視観察および指による接触法でほぼ全て検出できていたと判断される。

Fig. 7 は $D/d = 16$ の試験条件で $N = 4575$ cycle にて試験を打ち切って分解調査したときの、ロープ内部（外層の谷および底部相当）の素線の断線状況である。

3.3 素線損傷状態

Fig. 8 には内部の摩耗状態を模式的に示している。このように最も顕著な素線摩擦はストランド同士の接点、すなわち、外層素線の谷部で生じている。しかし、断線が優先的に生じる底部では、破壊の起点にさほど激しい摩耗がみられないことが多かった。

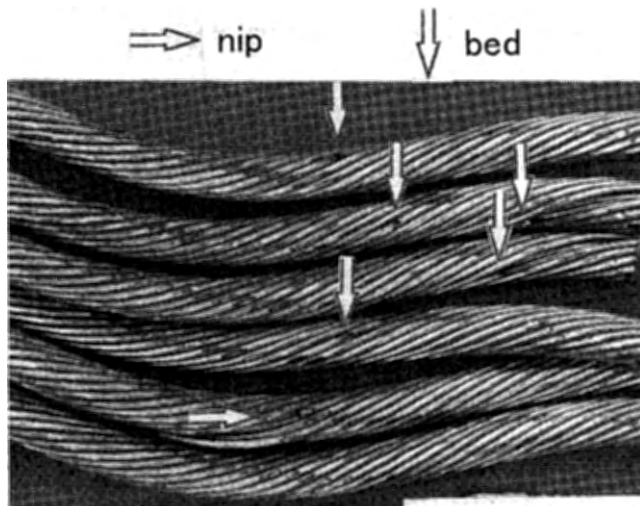


Fig. 7 Feature of internal wire breaking ($D/d = 16$, $N = 4575$ cycle)
内部素線断線の状況

4. 考察

4.1 断線数の増加特性について

Fig. 2 および Fig. 3 の例で示したように可視断線数の最大値 $C_{v,max}$ がストランド素線総数の 10% 程度になると、全体的に可視断線数が急増しており、これ以後ロープ破断までの余寿命は非常に少ない ($D/d = 16$ で寿命の 10% 以下, $D/d = 12.8$ で 5% 以下の程度)。

これは、3.2 節の実素線断線状況が示すように、 $D/d = 16$ およびより厳しい条件の $D/d = 12.8$ のいずれの場合においても、可視断線よりも内部断線の方が多く、可視断線 10% の時点ではロープ全体として相当に損傷の激しい状態になっているためである。

4.2 可視断線数の繰返し数依存性の表示式

繰返し数 N と可視断線数の最大値 $C_{v,max}$ 関係を両対数グラフにプロットした結果を Fig. 9 に示す。この

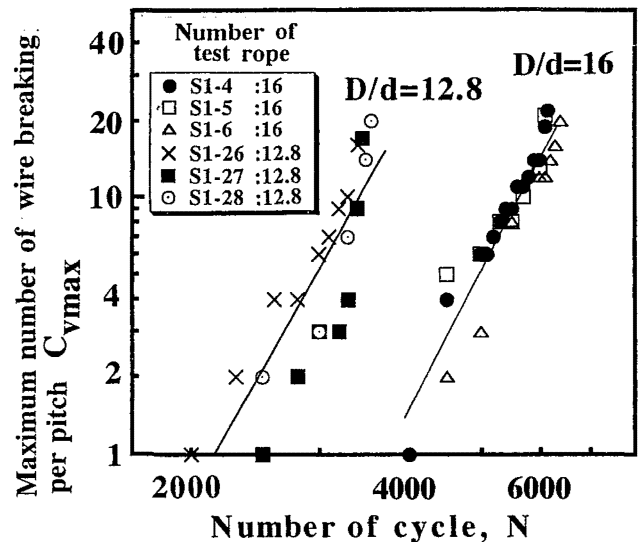


Fig. 9 Dependence of the maximum number of visible wire breaking on N
可視断線数最大値と S 曲げ繰返し数の関係

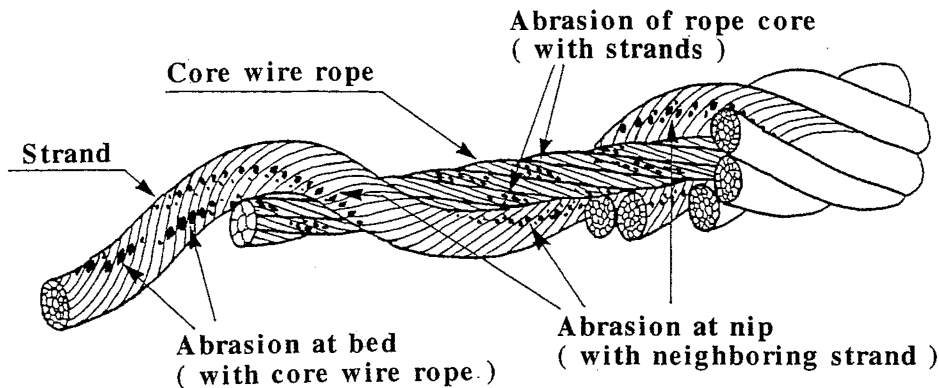


Fig. 8 Schematic illustration of internal wear at nip and bed position
谷部および底部での摩耗状態のスケッチ

結果から両者の対数にはほぼ直線関係があると推測され、それは次式で近似できそうである ($D/d = 16$ の場合、相関係数 $r = 0.94$, $D/d = 12.8$ の場合 $r = 0.86$) ,

$$C_{v\max} = A \cdot N^m \quad (1)$$

ここで、 A および m は定数で本実験の範囲では $D/d = 16$ の場合それぞれ、

$$A = 8.81 \times 10^{-21}, \quad m = 5.61$$

また $D/d = 12.8$ の場合次の値となる。

$$A = 1.66 \times 10^{-17}, \quad m = 5.61$$

この式で明らかなように D/d の影響は係数 A に対して大きい。これは素線相互の影響を無視すれば、ロープの曲げによって素線に生じる応力が D/d に反比例し、 D/d の小さいほど素線の曲げ応力が大きくなり、素線の断線寿命が短くなるためと考えられる。

4.3 スtrand素線断線数の繰返し数依存性の表示

$D/d = 12.8$ の場合について、strand中の素線断線数と繰返し数の関係を素線種別 (δ_3, δ_1 および δ_0) に両対数表示したのが Fig. 10 である。この場合、外層素線断線数 $C_{0\max}$ および総素線断線数 $C_{t\max}$ 、可視断線の場合よりむしろ良好な直線関係となっており、次式で近似的に表示できる。

$$C_{0\max} = 3.68 \times 10^{-15} \cdot N^{4.25} \quad (2)$$

$$C_{t\max} = 1.03 \times 10^{-13} \cdot N^{3.88} \quad (3)$$

心素線断線数 $C_{c\max}$ および内層素線断線数 $C_{i\max}$ についてはデータの少ないこともあって明確ではないが、上記と同様に直線近似すると以下のようなになる。

$$C_{c\max} = 5.73 \times 10^{-11} \cdot N^{2.92} \quad (4)$$

$$C_{i\max} = 3.80 \times 10^{-47} \cdot N^{12.41} \quad (5)$$

ただ、これらは断線数そのものが少なく、ロープの損傷状態に対してはわずかな影響しか与えないと思われる。結局は、Fig. 10 で明瞭なように、素線断線の大部分はstrand外層素線であり、それらによってstrandひいてはロープの強度が支配されることが分かる。

4.4 可視断線数とstrand素線断線総数との関係

式 (1) と式 (3) とから、 $D/d = 16$ の試験条件では、可視断線数の最大値 $C_{v\max}$ とstrand素線断線総数 $C_{t\max}$ との関係は次式で与えられる。

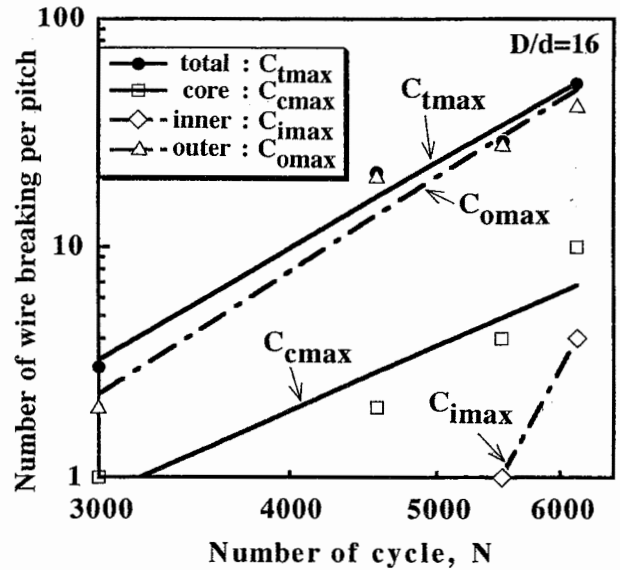


Fig. 10 Dependence of the number of wire breaking at each position on N
素線種別断線数とS曲げ繰返し数の関係

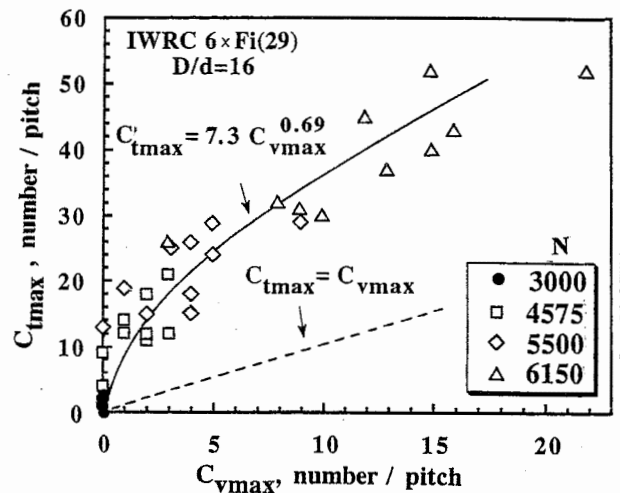


Fig. 11 Correlation between $C_{t\max}$ and $C_{v\max}$
可視断線数最大値とstrand素線断線総数の関係

$$C_{t\max} = 7.3 C_{v\max}^{0.69} \quad (6)$$

これは Fig. 11 に示す両者の関係についての実験結果と良い対応を示している。

Fig. 11 から、 $D/d = 16$ の場合、可視断線が総素線数 132 本の約 10% の 13 本程度になるまでは、総断線数は可視断線数の 3 倍以上の状態であること、換言すれば外層断線に比べ外観的に検出できない内部断線は約 2 倍以上の状態であり、明らかに内部先行形の損傷特性のあることが分かる。

$D/d = 12.8$ の場合、 $D/d = 16$ の場合と大差はないが内部先行性がさらに著しい傾向がある。これはこの

範囲では D/d が小さいほど曲げ応力状態が厳しいためと思われるが、その詳細については今後検討が必要である。

また、3.3 節に述べた摩耗の少ない部分での断線については、曲げ応力の繰返しが原因と考えられるが、これも応力の解析あるいは測定による検討が必要と考えている。

4.5 別のワイヤロープの場合

なお、この種の検討を IWRC 6× WS(31) についても予定していたが時間の関係で実施できなかった。しかし、端緒的な検討によれば、このタイプのロープでは、S 曲げ繰返し数の増加に伴う断線数の増加が一様なべき乗曲線に乗りにくい傾向がみられた。これは、このロープでは断線が谷部に優先的に生じるが、ストランドの内層素線が相対的に外層素線より細いために、耐疲労性があるため、そこから長期間持ちこたえる特徴があるためのものである。いずれにしても、本格的な解明は今後の課題である。

5. 結 論

鋼心入りワイヤロープ IWRC 6× Fi(29) について S 曲げ疲労試験を実施し、素線断線に着目して損傷の進行挙動を調べた結果、本実験の範囲で、以下のことが明らかになった。

- (1) $D/d = 16$ および 12.8 のいずれの条件においても、全寿命を通して素線断線の内部先行性は変わらず、従って、損傷の初期のほうが後期に比べ一層内部断線の割合が多い。
- (2) 可視断線数の最大値 $C_{v\max}$ の繰返し数 N への依存性は次式で近似できる。

$$C_{v\max} = A \cdot N^m$$

ここで、 A および m は定数で、 $D/d = 16$ の場合、それぞれ 8.81×10^{-21} および 5.61、また $D/d = 12.8$ の場合、それぞれ 1.66×10^{-17} および 5.61 である。 D/d の影響は係数 A に対して大きい。

- (3) $D/d = 16$ の場合、ストランド外層素線断線総数の最大値 $C_{0\max}$ および同ストランド総素線断線数 $C_{t\max}$ の繰返し数 N への依存性は次式で近似できる。

$$C_{0\max} = 3.68 \times 10^{-15} \cdot N^{4.25}$$

$$C_{t\max} = 1.03 \times 10^{-13} \cdot N^{3.88}$$

- (4) $D/d = 16$ の場合、その $C_{t\max}$ は可視断線数の最大値 $C_{v\max}$ の関数として次式で与えられる。

$$C_{t\max} = 7.3 C_{v\max}^{0.69}$$

この種の関係式はロープの損傷状態を内部も含めて詳細に検討する場合に極めて有効と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 田中正清, 鴻巣真二, S 曲げ疲労を受けるワイヤロープの損傷挙動の定量評価, 材料, 第 44 巻・第 503 号 (1995), pp. 1086-1091.
- 2) クレーン構造規格, 安全衛生法便覧, (1993), p. 2116.
- 3) ISO 4309-1990, Crane Wire Rope Code of Practice for Examination and Discard.
- 4) 田中正清, セイフティエンジニアリング, 第 17 巻・第 4 号 (1991), pp. 6-10.
- 5) 田中正清, 資源・素材 '93, 資源・素材関係学協会合同秋季大会研究分科会, “ワイヤロープ”, (1993), p. 36.

(平成 10 年 11 月 25 日受理)