

動索の経年損傷評価

本田 尚*1 山口 篤志*1 山際 謙太*1 佐々木 哲也*1

クレーンに使用されるワイヤロープのうち、巻上ロープやジブ起伏ロープといった動索には、高強度化と形崩れ防止を目的として鋼心ワイヤロープが使用される。本研究は、これら動索の経年損傷特性を明らかにするために、代表的な鋼心ワイヤロープ IWRC 6×Fi(29)と IWRC 6×WS(31)の2種類について、2つのシーブ間で180°折り返すS字曲げ疲労試験を行い、ロープに掛かる張力が可視断線数と総断線数に及ぼす影響について調査した。その結果、IWRC 6×Fi(29)は可視断線が発生した時点で、すでにクレーン構造規格の廃棄基準である総素線数の10%を超える素線断線が発生し、張力が小さくてもシーブを通過する回数が多いと、破断荷重が低下する傾向がある。一方、IWRC 6×WS(31)は張力によって可視断線数と総断線数の関係に変化はみられないが、可視断線が総素線数の4%に達すると、ほぼ半数の素線が断線し、張力が大きくなるほど急激に断線が進行する傾向がある。このように、ワイヤロープの種類および張力によって経年損傷特性は大きく異なることから、素線断線数だけで評価する現在の廃棄基準は危険である。そこで、張力の大きさとシーブを通過する回数から余寿命を評価する新たな損傷評価法を提案した。この評価法は、張力を縦軸に、破断までにシーブを通過した回数の対数を横軸として、疲労試験結果を片対数グラフ上で整理することで、ワイヤロープの余寿命を簡易に評価できる。

キーワード: クレーン、鋼心ワイヤロープ、動索、疲労、非破壊検査

1 はじめに

天井クレーンや移動式クレーンにおいて、経年損傷したワイヤロープが切断し、落下したつり荷や倒壊したジブの下敷きになるなど、毎年多数の労働者が被災している。我が国ではクレーン構造規格において、ワイヤロープは総素線数の10%が断線した場合に廃棄すると定められている¹⁾。しかし、ワイヤロープの素線断線を内部まで正確に検査することは難しく、ロープ表面の可視断線数によって経験的に廃棄かどうか判断しているのが現状である。

クレーンに用いられるワイヤロープの中でも、特に巻上ロープやジブ起伏ロープといった動索は、近年の高荷重、高揚程に対応するために、心綱に鋼索を用いた高強度でロープ径の小さい鋼心ワイヤロープが採用されている。ワイヤロープの経年損傷特性は、心綱が従来の繊維索から鋼索に変わったことによって大きく変化し、可視断線より内部断線が先行するようになる²⁾。しかし、定期自主検査や性能検査におけるワイヤロープの検査は目視が中心であり、内部断線を検出する有効な検査法はない。そのため内部断線が見逃され、ワイヤロープ切断災害が発生する原因となっている³⁾。

目視中心の検査と、内部断線を検出する有効な手法がない現在、同種の事故を防止するには、ワイヤロープ表面の可視断線数と内部断線数の関係を明らかにし、可視断線数から総断線数を評価する必要がある。また、動索に掛かる張力は、つり荷の重量やジブの長さおよび角度で大きく変動する。しかし、異なる張力下で損傷したワイヤロープの可視断線数と総断線数の関係を明らかにした例はない。そこで本研究は、動索として代表的なファイラー形鋼心ワイヤロープとウォリントン・シール形鋼心ワイヤロープの2種類について、異なるロープ張力下で2つのシーブ間を180°折り返すS字曲げ疲労試験を行い、一定数の可視断線が発生した時点での可視断線数と総断

線数の関係について調査した。

加えて現在の廃棄基準は、ワイヤロープがどのように使用されてきたか、その履歴を全く考慮していない。本研究では、疲労試験の結果からワイヤロープの使用履歴を考慮しないことの危険性を指摘し、使用履歴を考慮した余寿命評価法を提案した。また、定期自主検査や性能検査におけるワイヤロープの検査は目視が中心であり、ワイヤロープ内部の損傷評価が難しい。そこで、断線箇所から漏洩する磁束を検出する漏洩磁束法によって、内部断線の非破壊損傷評価を試みたので報告する。

2 実験方法

2.1 試験体

試験体には、クレーンの動索として一般的に用いられる直径16mmのファイラー形およびウォリントン・シール形鋼心ワイヤロープを使用した。ファイラー形には、図1に示す総素線数132本のIWRC 6×Fi(29)を採用した。ファイラー形鋼心ワイヤロープの特徴は、ストランド(小縄)の外層素線が細く、内層素線が太い。そして、外層素線と内層素線の隙間をファイラー(filler)線と呼ぶ非常に細い素線で埋め、充填率を向上させていることにある。なお、ファイラー線はワイヤロープの強度に寄与しないため、素線として扱われず、総素線数には計上しない。

ウォリントン・シール形には、総素線数186本のIWRC 6×WS(31)を採用した。図2に断面を示す。ウォリントン・シール形鋼心ワイヤロープの特徴は、ファイラー形と反対に、外層素線が太く、内層素線が細い。また、内層素線は2層で構成される。外層素線を太くすることで、ファイラー形に比べ耐疲労特性が向上している。なお、公称破断荷重は、どちらも173 kNである。

2.2 疲労試験方法

疲労試験には、図3に示すワイヤロープ疲労試験機を使用した。ワイヤロープには図中右側のテンションシーブで張力を負荷し、中央の2つのテストシーブ間を往復

*1 機械システム安全研究グループ

させることでS字曲げを行う。往復運動のストロークは2 mである。テストシーブ径 D とロープ公称径 d の比 D/d は、クレーン構造規格¹⁾で最小の16とした。ワイヤロープの直径 d は16 mmであることから、テストシーブの直径 D は256 mmになる。S字曲げ疲労試験におけるテストシーブとワイヤロープのジオメトリを図4に示す。折返し角は180°の完全折返しである。

使用したワイヤロープの公称破断荷重は173 kNであり、安全率が5であることから¹⁾、このワイヤロープの最大荷重は34.6kNになる。そこで、ロープに負荷する張力 T は34.6 kNを4分割し、8.7, 17.3, 26.0 および

34.6 kNの4種類とした。各張力とも破断まで疲労試験を行うとともに、可視断線が発生した時点、可視断線が総素線数の4%および10%発生した時点で疲労試験を打ち切り、ワイヤロープを中央から左右に1ピッチ(1より:直径 d の6倍の長さ)毎に10箇所、計20箇所で切断し、各ピッチの素線断線数を計測した。

3 疲労試験結果

3.1 繰返し速度の影響

S字曲げ疲労試験において、最適な繰返し速度を決定するために、フィラー形鋼心ワイヤロープ IWRC

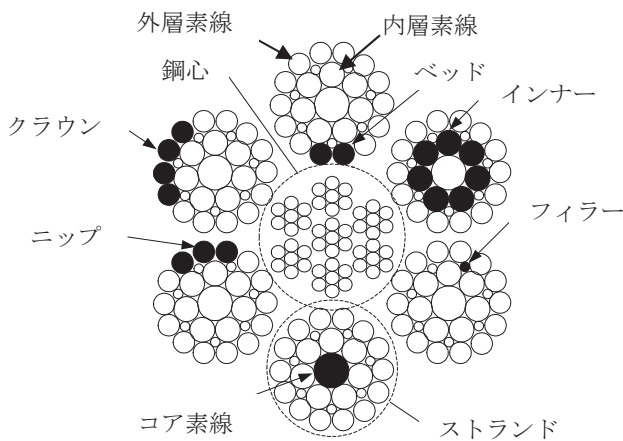


図1 IWRC 6xFi(29)の断面構成

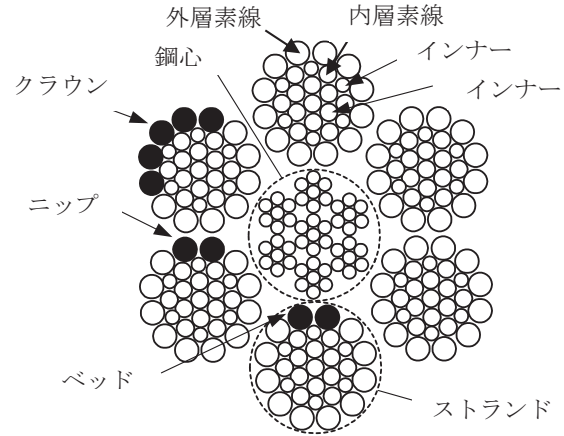


図2 IWRC 6xWS(31)の断面構成

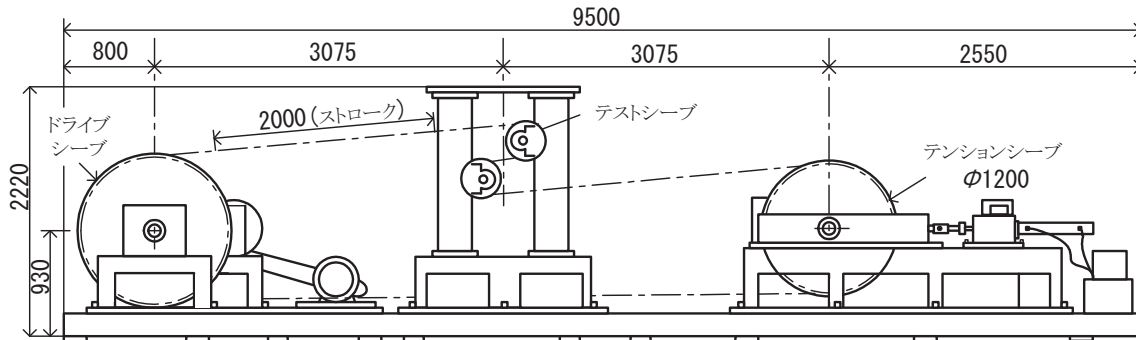


図3 ワイヤロープ疲労試験機

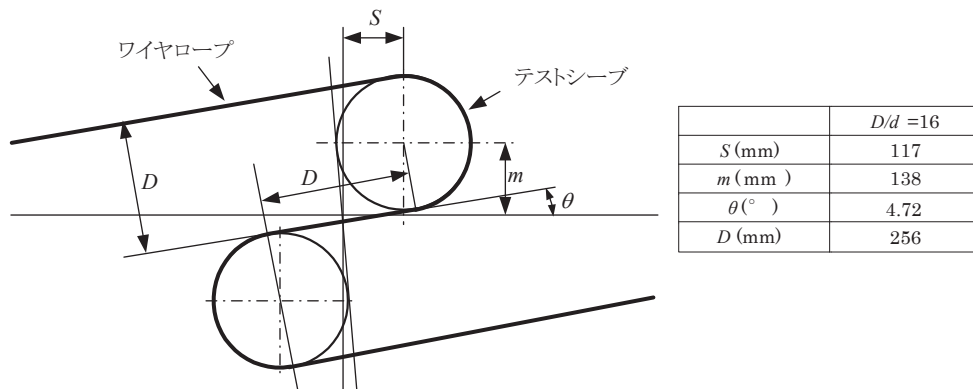


図4 S字曲げ疲労試験におけるテストシーブとワイヤロープのジオメトリ

6×Fi(29)を使用して、疲労強度に及ぼす繰返し速度の影響を調査した。張力は最大張力である 34.6 kN とし、可視断線が総素線数の 10%に達した時点で疲労試験を中断し、素線断線数を計測した。素線断線数は、ほぼ均等に断線する、試験体中央から右に 4 ピッチの平均とした。

図 5 に素線断線数と繰返し速度の関係を示す。素線断線数は、外層素線の Bed の位置が最も多く、続いて外層素線の Nip の位置であり Crown の位置ではほとんど断線しない。Nip と Inner の断線数は、繰返し速度が 10 cycles /min より大きくなると著しく増加する。この原因として、繰返し速度が大きくなるとワイヤロープの温度が上昇して潤滑油が流出し、潤滑不良になることが考えられる。そこで、赤外線カメラ Nikon LAIRD-S270 で試験中のワイヤロープの温度を計測するとともに、ワイヤロープから滴下した潤滑油の量を調査した。

図 6 に計測した試験中の温度分布の一例を示す。繰返し速度は、6 cycles/min である。ワイヤロープの表面温度は 50℃弱と、周囲で最も高い。図 7 に、繰返し速度とワイヤロープの温度および潤滑油の滴下量の関係を示す。ワイヤロープの温度は繰返し速度に比例し、14 cycles/min では 85 °C に達している。これは当該ワイヤロープに使用されている潤滑油の滴点 (72℃) を大きく上回る。潤滑油の滴下量は、繰返し速度が 6 cycles/min より大きくなると急増するため、潤滑を考えると繰返し

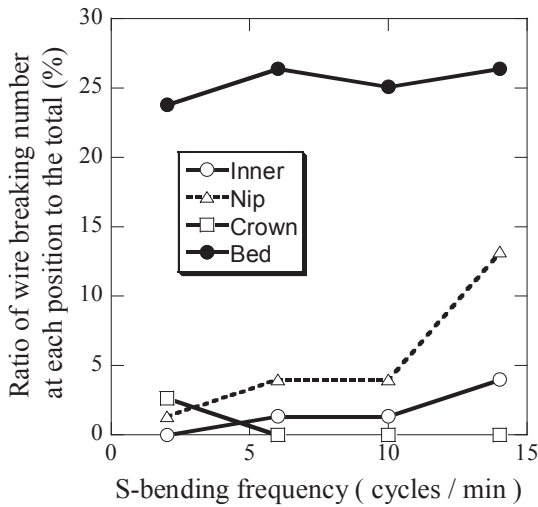


図 5 素線断線数と繰返し速度の関係

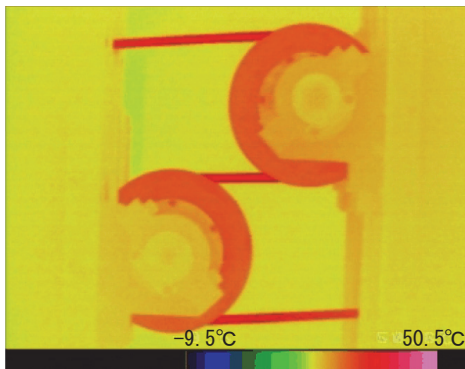


図 6 疲労試験中の温度分布計測例

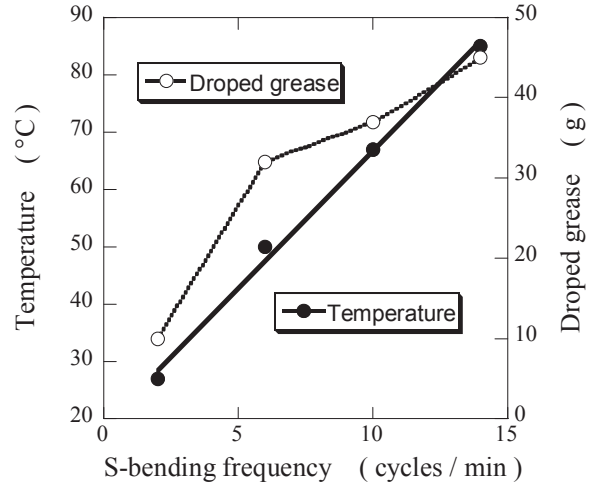


図 7 ワイヤロープの温度および潤滑油の滴下量と繰返し速度の関係

速度は小さい方が望ましいが、疲労試験に時間がかかる。図 5 で示したように、潤滑油の滴点以下である 10 cycles/min では、素線断線数は繰返し速度の影響を受けないことから、ワイヤロープは十分に潤滑されていると考えられる。そこで、本研究では S 字曲げ疲労試験の繰返し速度を 10 cycles /min とした。

3.2 フィラー形鋼心ワイヤロープの経年損傷特性

フィラー形鋼心ワイヤロープ IWRC 6×Fi(29)の S 字曲げ疲労試験を行い、ロープに負荷する張力が素線断線に及ぼす影響を調査した。各張力とも破断まで疲労試験を行うとともに、可視断線が発生した時点、可視断線が総素線数の 4%および 10%発生した時点で疲労試験を打ち切り、素線の断線数を計測した。写真 1 に一例として、Nip (谷) に可視断線が発生したしたワイヤロープの外観を示す。可視断線は Nip 断線が多く、Crown (山) 断線はほとんど観察されていない。

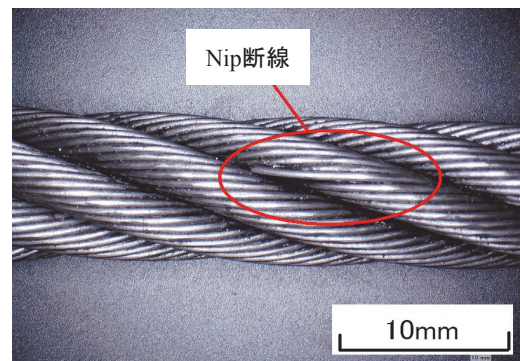


写真 1 IWRC 6×Fi(29)に発生した可視断線

総断線数と繰返し数の関係を図8に示す。総断線数は、繰返し数が増加すると指数関数的に増加する。破断までの繰返し数（破断寿命）は、低張力（ $T=8.7, 17.3\text{kN}$ ）と高張力（ $T=26.0, 34.6\text{kN}$ ）の2つグループに分かれ、両者には約2倍の寿命差がある。

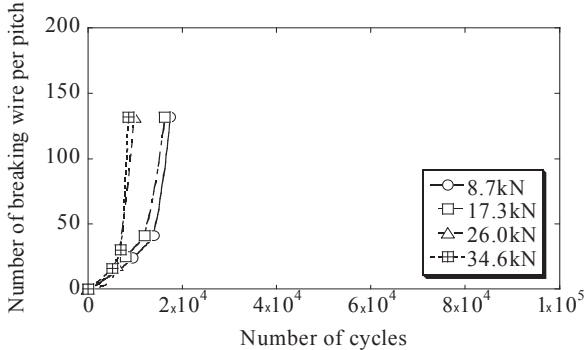


図8 IWRC 6x7Fi(29)の総断線数と繰返し数の関係

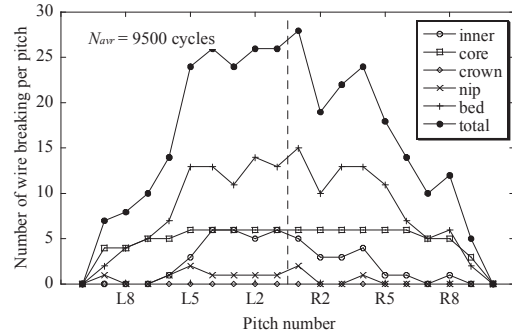
次に、目視で可視断線が検出された時点で疲労試験を中止し、素線断線数と断線位置を詳細に調査した。図9に、可視断線が発生した時点の素線断線位置と断線数を示す。ここで可視断線とは、ストランドから飛び出し、目視で判別できた断線を指す。図の横軸は試験体中央から左右に切断したピッチの番号であり、縦軸は素線断線数である。なお、素線断線数は、同じ張力で3回疲労試験を行い、その平均とした。

各張力とも試験体中央で素線断線数が多く、両端に向かうにしたがって減少する。これは、次のような理由による。往復運動のストロークは2mであることから、一往復する間に試験体中央は、上下2つのシーブで4回の曲げ・曲げ戻し変形を受ける。しかし、試験体中央から1m以上離れたら、一往復で2回しか曲げ・曲げ戻し変形を受けず、曲げ変形を受ける距離も短くなる。このように、1本の試験体でも場所によって曲げ・曲げ戻し回数および曲げを受ける距離が異なることが、素線断線数が山形に分布する原因である。

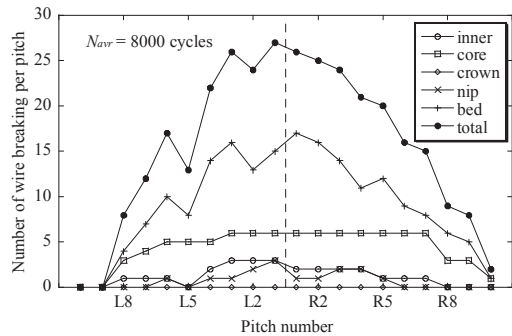
各張力における素線断線数を詳細に比較すると、総断線数は低張力ほど多く、張力が大きくなるにしたがい減少する。部位別にみると、いずれの張力もBed断線が最も多く、次いでCore線、Inner線の順である。Bed断線があまり張力によって変化しないのに対し、Core線とInner線は、張力が大きくなると減少する。特にCore線の減少が著しい。これは、可視断線が発生するまでの繰返し数 N が、最小張力 $T=8.7\text{kN}$ は9,500 cyclesなのに対し、最大張力 $T=34.6\text{kN}$ では5,200 cyclesと、半減することに起因する。Core線とInner線は、いずれも内層素線であり、これらの断線は繰返し数、すなわちシーブによる曲げ・曲げ戻し回数に敏感である。なお、可視断線4%および10%での素線断線数も、同様に張力が大きくなるほど総断線数が減少する傾向がある。

このようにIWRC 6x7Fi(29)では、断線が最も顕著なの

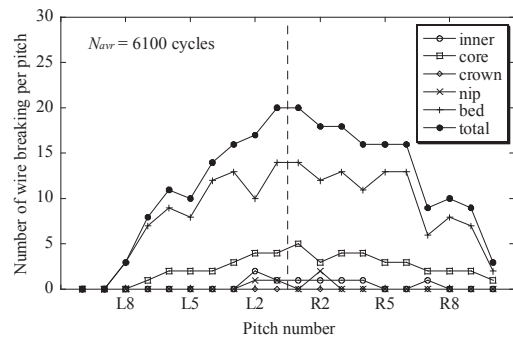
はBed断線であり、外層素線であっても、鋼心と接する位置にあるため、外観から判別できない。次いで多いCore線とInner線は内層素線であり、これらも外観からは判別できない。そこで、可視断線からワイヤロープの経年損傷を評価するために、可視断線発生時における可視断線および内部断線と張力の関係を求めた。なお、断線数は分布するため、断線数はほぼ一様に断線する中央



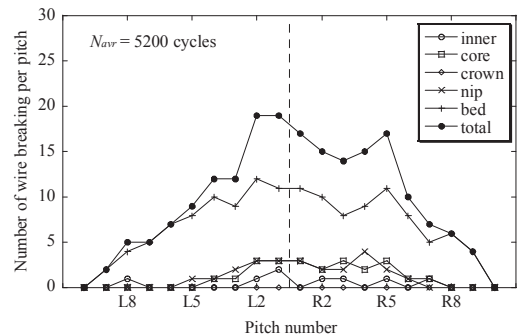
(a) $T=8.7\text{kN}$



(b) $T=17.3\text{kN}$



(c) $T=26.0\text{kN}$



(d) $T=34.6\text{kN}$

図9 可視断線発生時の素線断線位置と断線分布

から左右 4 ピッチの平均とした。結果を図 10 に示す。

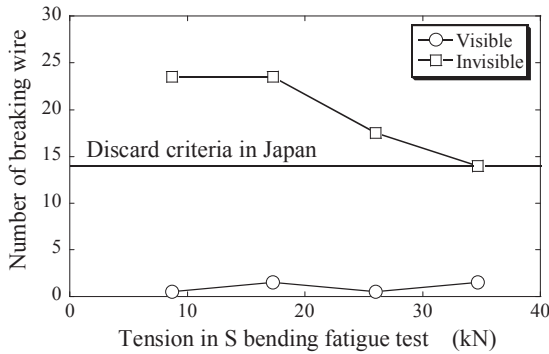


図 10 可視断線発生時の内部断線と張力の関係

IWRC 6xFi(29)では、張力が大きくなると内部断線数が減少する。可視断線が発生した時点で、最小張力 $T = 8.7$ kN における内部断線数は 24 本であり、最大張力 $T = 34.6$ kN の 14 本の約 2 倍である。このロープの総素線数は 132 本であるから、総素線数の 10%以上、すなわち 14 本の素線が断線した時点で廃棄しなくてはならない⁴⁾。IWRC 6xFi(29)は、少なくとも $D/d = 16$ の下で可視断線が発見された時には、全ての張力で廃棄基準を超えている。

3.3 フィラー形鋼心ワイヤロープの残存強度評価

フィラー形鋼心ワイヤロープは、可視断線に比べ内部断線が著しく先行するため、少なくとも $D/d = 16$ で使用している場合、定期点検で可視断線が発見された時は、すでに廃棄時期を過ぎている。しかし、現在の目視中心の検査では、可視断線が発生する前にワイヤロープの経年損傷を検出するのは困難である。そこで、可視断線が検出された時点で、どの程度危険なのか調査するために、損傷したワイヤロープの引張試験を行い、破断荷重の低下率を調査した。

ところで ISO 4309:2010 “Cranes - Wire ropes - Care and maintenance, inspection and discard”では、ワイヤロープの廃棄基準は可視断線が総素線数の約 4%^{*}に達したときと定められている⁴⁾。JIS B8836:2007「クレーンワイヤロープ—取扱い、保守、取付け、検査及び廃棄」⁵⁾はその翻訳規格であるため、任意規格とはいえ、我が国でも可視断線数による廃棄基準が定められている。ただし、クレーン構造規格が強制法規であるため、JIS B8836:2007 には総素線数の 10%と可視断線の 4%という二つの廃棄基準が併記されており、両者の整合性が問題となっている。加えて、曲げの応力分布では、通常、表面が最大応力になる。このため、使用者の一部は、ワイヤロープの素線は表面で断線し、表面すなわち可視断線が 10%に達するまで使用できると誤認しているから

* ISO 規格では、ワイヤロープの種類、構成毎に具体的な断線数が記載されているが、計算すると総素線数の 4%に相当する。

いがある。

そこで、可視断線が 1 本検出時 (0.8%可視断線)、4%可視断線および 10%可視断線検出時の三つの場合について、それぞれ引張試験を行い、破断荷重の低下率を調査した。引張試験の結果を図 11 に示す。なお、縦軸は破断荷重を公称破断荷重で除し、無次元化している。

破断荷重は、いずれの可視断線数でも張力が小さいほど小さくなる。可視断線が 1 本発生した時点 (0.8%) では、最大張力 $T = 34.6$ kN は公称破断荷重の 80%程度、最小張力 $T = 8.7$ kN でも 60%程度の強度が残っており、定格荷重 (公称破断荷重の 20%) に対して、十分な強度を有している。しかし、可視断線が 4%発生すると、破断荷重は張力が小さくなるにつれて急激に低下し、最小張力 $T = 8.7$ kN では、ほぼ定格荷重まで減少する。これ

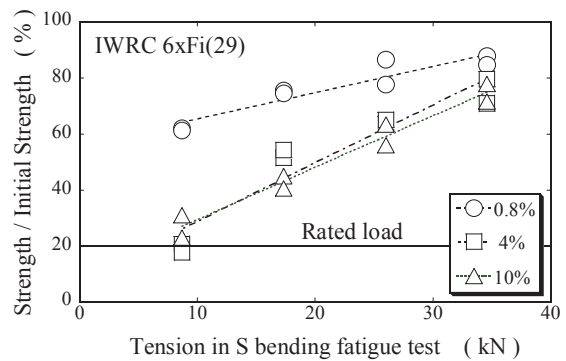


図 11 一定数の可視断線発生時の破断荷重と張力の関係

は、安全率にすると 1 という全く余裕がない状態であり、非常に危険な値である。

また、可視断線 4%と可視断線 10%では破断荷重に差がみられない。これは、図 12 に示すように、4%および 10%可視断線検出時の総素線断線数が、ほぼ同一のためである。なぜ、このような結果となるのか、疲労試験中のワイヤロープを観察したところ、可視断線が 4%を超えると、通常目視では判別しにくい Nip (谷) 断線がストランド (小縄) から飛び出し、急に判別しやすくなる。これは、素線がある一定数以上断線すると、シーブを通過しても曲げ変形を受けなくなるためと考えられる。そこで、4%および 10%可視断線が発生する繰返し数の関係を調査したところ、図 13 に示すように、可視断線が

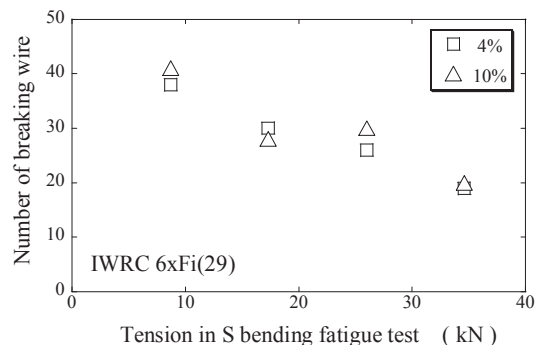


図 12 4%および 10%可視断線発生時の総素線断線数

4%検出される繰返し数と、可視断線が 10%検出される繰返し数は、どの張力でも、ほとんど変わらないことが判明した。したがって、IWRC 6×Fi(29)の場合、可視断線数が 4%から 10%に増加しても、すでに破断していた素線が目視で容易に判別できるようになるだけで、総断線数が増えることはない。これが可視断線 4%と可視断線 10%で、破断荷重に差が生じない原因である。

なお、張力が小さくなると破断荷重が低下する理由は、素線断線数が繰返し数に敏感なことに起因する。図 13 に示したように、4%および 10%の可視断線が検出される繰返し数は、張力が減少すると増加し、最小張力 $T =$

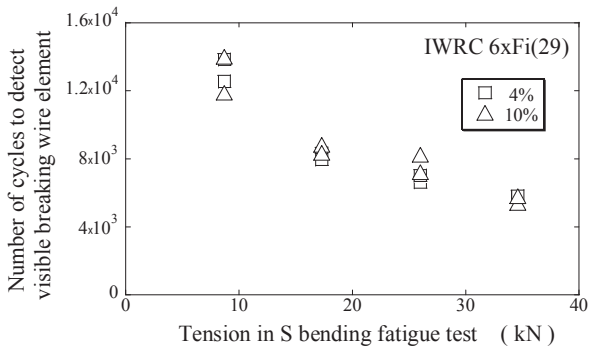


図 13 張力と 4%および 10%可視断線が発生する繰返し数の関係

8.7 kN では最大張力 $T = 34.6$ kN の約 3 倍に増加する。その結果、図 12 のように、低張力ほど素線断線数が多くなり、破断荷重が低下する。

このように、IWRC 6×Fi(29)は低張力で使用するほど破断荷重が低下する傾向にあり、可視断線が総素線数の 4%に達すると、定格荷重とほぼ同等の破断荷重まで強度が低下する。したがって、IWRC 6×Fi(29)は、可視断線が検出された時点で廃棄するのが安全である。

3.4 ウォリントン・シール形鋼心ワイヤロープの経年損傷特性

ファイラ形鋼心ワイヤロープと同様に、ウォリントン・シール形鋼心ワイヤロープ IWRC 6×WS(31)の S 字曲げ疲労試験を行い、張力が素線断線に及ぼす影響を調査した。各張力とも破断まで疲労試験を行うとともに、可視断線が発生した時点、可視断線が総素線数の 4%および 10%発生した時点で疲労試験を打ち切り、素線断線数を計測した。

総断線数と繰返し数の関係を図 14 に示す。ファイラ形と同様に、総断線数は繰返し数が増加すると指数関数的に増加する。破断までの繰返し数（破断寿命）は、張力が小さいほど増加し、最小張力 $T = 8.7$ kN では約 9×10^4 回と、最大張力 34.6 kN の 1×10^4 回に比べて 9 倍に増加する。なお、図 9 に示したファイラ形の結果と比較すると、最小張力 $T = 8.7$ kN での破断寿命は、ファイラ形の約 2×10^4 回に比べて、約 5 倍長い。しかし、最大張力 $T = 34.6$ kN では破断寿命はどちらも 1×10^4 回程度と、両者に差はない。ウォリントン・シール形ワイヤ

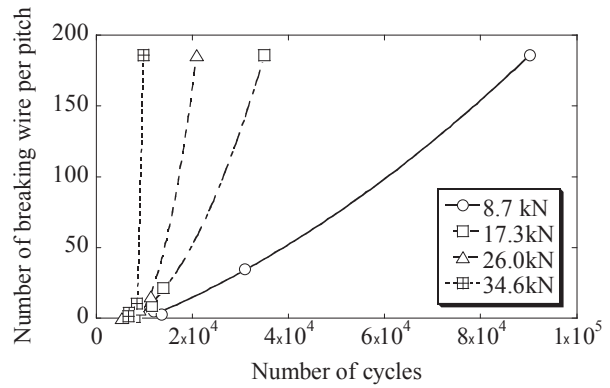
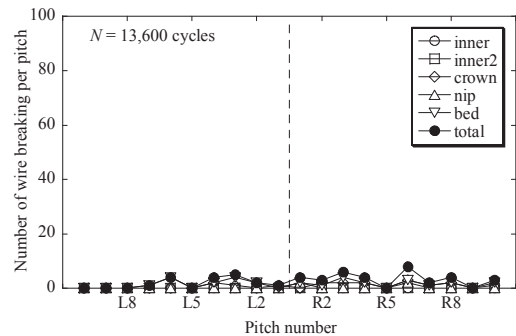


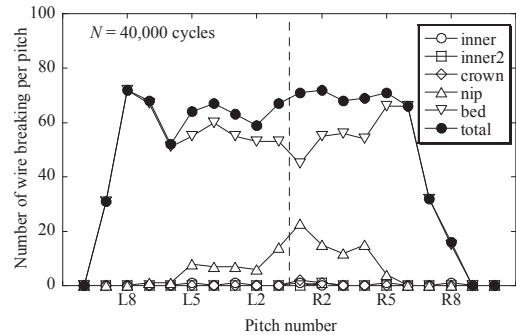
図 14 IWRC 6×WS(31)の総断線数と繰返し数の関係

ロープは耐疲労特性の向上を目的として開発されたが⁶⁾、張力が大きくなると急激に疲労寿命が短くなるので、注意が必要である。

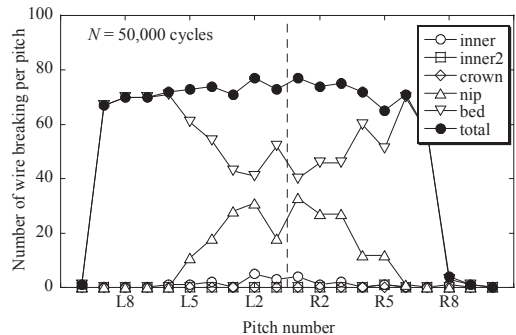
次に、各張力について素線の断線部位と断線数を詳細に調査した。図 15 に最小張力 $T = 8.7$ kN において、可視断線が発生した時点、可視断線が総素線数の 4%および 10%発生した時点の断線分布を示す。可視断線は、



(a) 可視断線検出時



(b) 4%可視断線発生時



(c) 10%可視断線発生時

図 15 IWRC 6×WS(31)の断線分布 ($T = 8.7$ kN)

Crown 断線および Nip 断線のうち、ストランドから飛び出して目視で判別できた断線である。断線分布はフィラー形と異なり、山形にはならず、どのピッチも均等に断線する。また、フィラー形では可視断線が発生した時点で多くの内部断線が発生するが、ウォリントンシール形では、可視断線が発生した時点の総断線数は6本程度である。これは総素線数の約3%に相当し、クレーン構造規格で定められた値(10%)の1/3である。一方で可視断線が4%発生すると、総断線数は急激に増加し、約70本と総素線数の40%に達する。また、可視断線が10%

発生しても、総断線数はほとんど増加しない。

4%可視断線における総断線数の急激な増加に張力が影響するか調査するため、張力をパラメータとして断線分布を比較した。図16に結果を示す。T=8.7~26.0 kNまでは、総断線数に張力の影響はみられないが、最大張力 T=34.6 kN だけは、総断線数が極端に減少している。断線箇所を詳細にみると、Bed 断線が最も多い。Bed は、内部で鋼心と接する位置であり、この位置の断線は、通常外部から見えない。しかし、最大張力だけは断線した素線がストランドから飛び出すため、目視で断線が判別可能であった。このため、図16に示したように、他の張力の1/3~1/4の繰返し数で可視断線が4%に達している。このように、Bed 断線の可視化によって、他の張力に比べ、少ない繰返し数で可視断線が4%に達したことが、最大張力 T=34.6 kN で総断線数の減少した理由と考えられる。

また、その他の張力についても素線断線箇所を詳細に観察した。断線数は張力に関係なく、鋼心と接する Bed の位置が最多であり、次いでストランド同士が接触する Nip が多い。Bed と Nip の断線分布は鏡対称であり、Bed の断線数が多いピッチは、Nip の断線が少なく、逆に Bed の断線が少ないピッチは Nip の断線が多い。Bed と Nip の断線は、いずれも外層素線であり、両者の合計でほぼ総断線数に相当する。フィラー形と異なり、Inner 線はほとんど断線しない。なお、外層素線総数は72本であり、可視断線数が総素線数の4%(今回の試験体では8本)発生すると、ほぼ全ての外層素線が断線する。

このように、鋼心ワイヤロープでは、ストランド(小縄)の外側でなく、内側の外層素線が著しく断線する。この原因について、次のように考察した。通常、曲げ変形では図17(a)のように表面で応力が最大となる⁷⁾。しかし、図17(b)のように、各層が分離し、層間すべりが可能であれば、内側の層ほど曲率半径 ρ が ρ' のように小さくなる。加えて心綱が繊維索から鋼索になったことで、内側の外層素線と心綱の間に高い接触圧が発生する⁸⁾。このため、シーブを通過する度に、接触する素線に微小往復すべりと繰返し応力が作用し、フレット疲労⁹⁾が生じる。このため、外層素線が Bed で断線すると考えられる。フィラー形鋼心ワイヤロープも同様の現象により、Crown (山)ではなく、Nip (谷)の位置で断線すると考えられる。

ワイヤロープは素線を擦ったストランドを、さらに擦って1本のロープとするため、幾何学的に非常に複雑な形状をしている。そのため、素線の応力分布は容易に求まらない。今後、有限要素法(FEM)による応力解析とひずみゲージを使用した応力測定により、素線応力分布の定量的検討を行う必要がある。

3.5 ウォリントン・シール形鋼心ワイヤロープの残存強度評価

ウォリントン・シール形鋼心ワイヤロープ IWRC 6×WS(31)の断線数は、可視断線が4%以上発生すると急

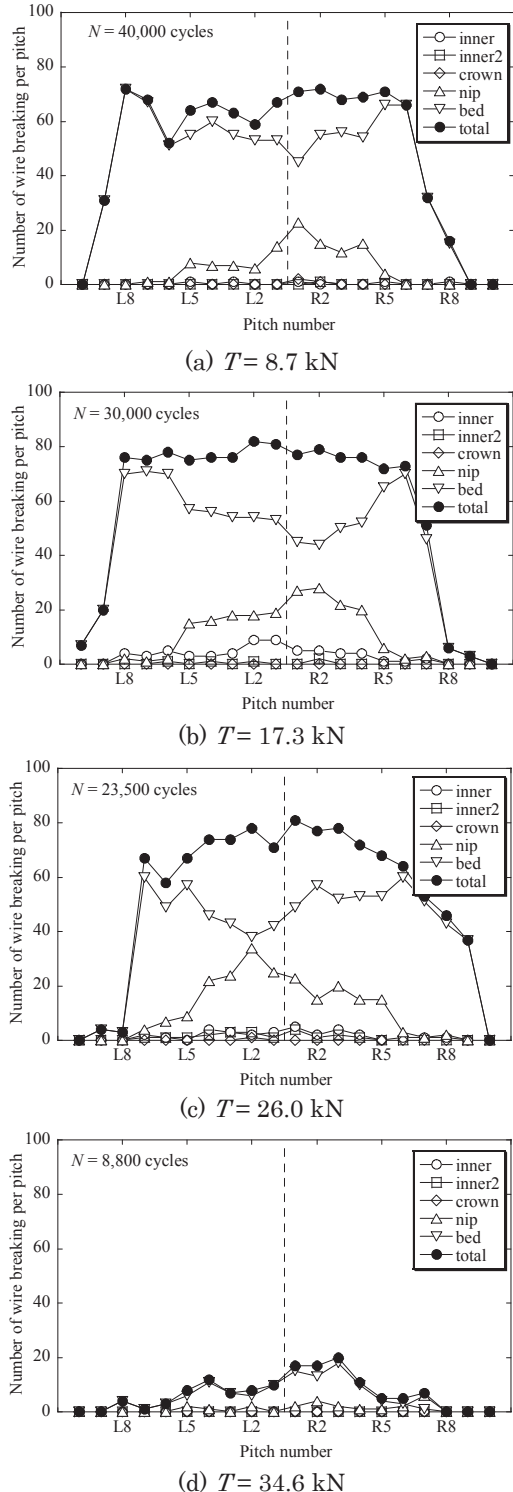
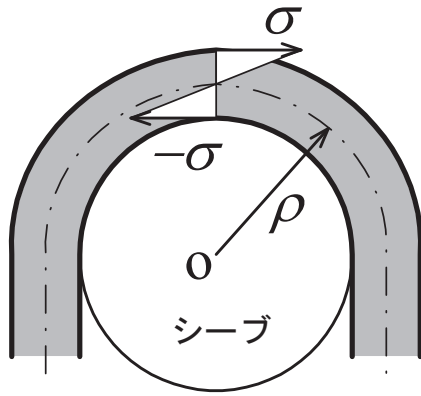
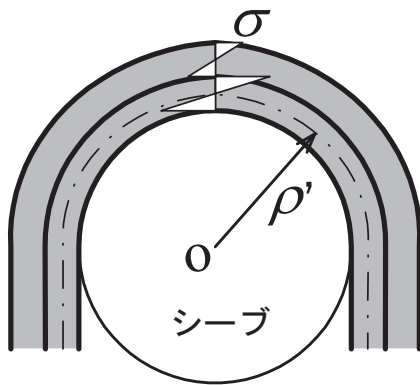


図16 各張力における4%可視断線発生時の断線分布



(a) 単層の場合の曲げ応力



(b) 複層かつ層間ですべる場合の曲げ応力

図 17 スtrandの内側外層素線が断線する原理

激に増加する。そこで、各張力において可視断線が総素線数の 4%および 10%発生した時点で疲労試験を中断し、疲労損傷した試験体の破断荷重を調査した。図 18 に結果を示す。なお、縦軸は初期の公称破断荷重で除して無次元化している。

4%可視断線発生時の IWRC 6×WS(31)の破断荷重は、フィラー形と異なり、張力にあまり影響されず、公称破断荷重の 80~90%と、十分な強度を有する。可視断線が 10%発生すると、破断荷重は明確に低下するが、それでも公称破断荷重の 50~70%が残存している。なお、最大

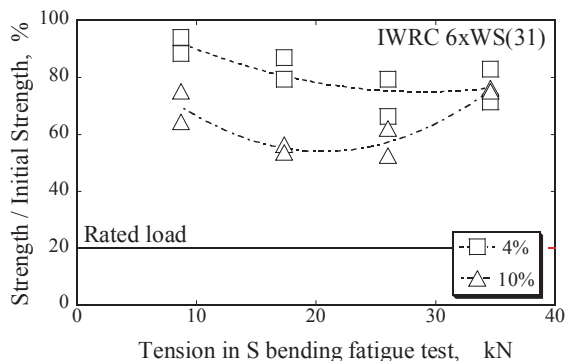
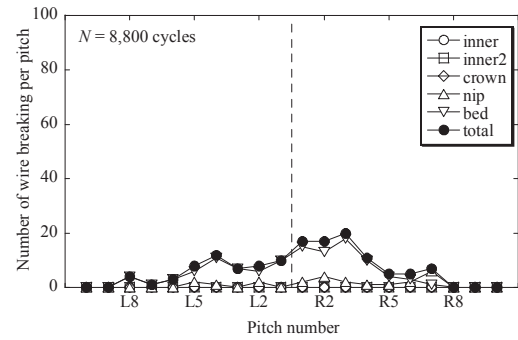
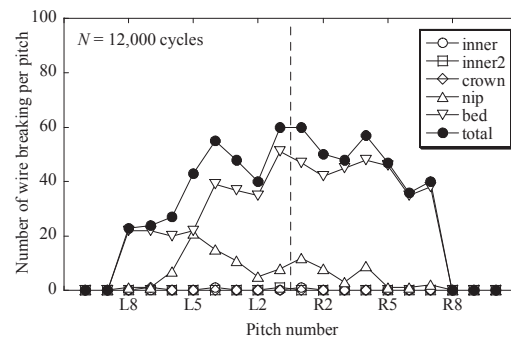


図 18 疲労損傷した IWRC 6×WS(31) の破断荷重と張力の関係



(a) 4%可視断線発生時の断線分布



(b) 10%可視断線発生時の断線分布

図 19 $T = 34.6$ kNにおける 4%および 10%可視断線発生時の断線分布

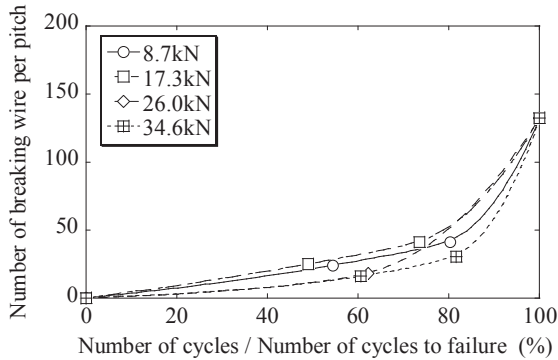
張力 $T = 34.6$ kN のみ破断荷重が低下していない。しかし、図 19 に示すように、 $T = 34.6$ kN における 4%および 10%可視断線発生時の断線分布を比較すると、断線数には明確な差が生じている。鋼心ワイヤロープが繊維心ワイヤロープに比べて高強度なのは、鋼心の強度による大きい。しかし、鋼心は素線とみなさないため、本研究では残念ながら鋼心の断線数を計測していない。ウォリントン・シール形の残存破断荷重が張力や素線断線数にあまり影響されないのは、鋼心の断線状態が影響している可能性があるが、これについては、今後の検討課題としたい。

4 ワイヤロープの余寿命評価

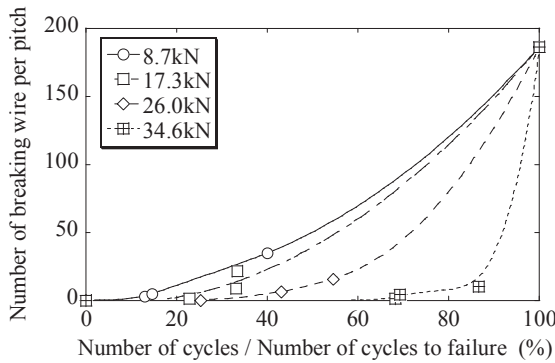
4.1 現行の廃棄基準の問題点

疲労試験の結果、フィラー形鋼心ワイヤロープの場合、可視断線数が同一でも張力によって内部断線数が大きく異なる。加えて、可視断線が発生した時点で破断荷重は大きく低下し、張力によっては許容荷重と同程度まで低下する。したがって、可視断線数から経年損傷を評価することは危険側の評価となる。一方、ウォリントン・シール形鋼心ワイヤロープは、可視断線が発生した時点では断線数は総素線数の 3%程度である。また、総素線数の 10%の可視断線が発生しても十分な破断荷重が残存する。しかし、ウォリントン・シール形鋼心ワイヤロープは、張力が大きくなると急激に断線が進行する傾向がある。図 20 に、図 9 および図 14 の総断線数と繰返し数の関係について、張力ごとに繰返し数を破断寿命で除し、

無次元化したものを示す。フィラー形鋼心ワイヤロープ IWRC 6×Fi(29)は、図 20(a)のように、各張力とも破断寿命に対して同じように断線が進行する。一方、ウォリントン・シール形鋼心ワイヤロープ IWRC 6×WS(31)は、図 20(b)のように、最小張力 $T=8.7$ kN では破断寿命の約 10%で断線が発生する。しかし、最大張力 $T=34.6$ kN では破断寿命の約 70%で断線が発生しており、破断寿命に対して最小張力の 7 倍遅く断線が発生する。このことは、IWRC 6×WS(31)は、定期点検の際に断線がないからといって交換しないでおくと、次の定期点検までに断線数が 100%を超え、破断する可能性があることを示唆する。



(a) IWRC 6×Fi(29)



(b) IWRC 6×WS(31)

図 20 無次元化した破断寿命と断線数の関係

定期点検の目的は、次の点検までの間の健全性を保証することであり¹⁰⁾、廃棄基準はそのためにあるとによってよい。しかし、現在のワイヤロープの廃棄基準は、その意味において不十分である。ワイヤロープが次の定期点検まで健全であることを保証するには、断線数だけでなく、そのワイヤロープがこれまでどのように使用されてきたか、その使用履歴を考慮し、余寿命を評価する必要がある。

4.2 使用履歴による余寿命評価

これまでの実験結果から、鋼心ワイヤロープの素線断線数は、繰返し数、すなわちシーブで曲げ・曲げ戻しを受けた回数と、負荷された張力に依存することが分かっ

ている。したがって、鋼心ワイヤロープの余寿命を推定するには、ワイヤロープがシーブを通過した回数と負荷された張力を考慮する必要がある。

一般に金属材料の疲労寿命は、 $S-N$ 線図といて、負荷した応力の振幅（もしくは応力範囲）と応力を負荷した回数で評価する¹¹⁾。ワイヤロープは細い素線を撚り合わせた複雑な構造をしているが、材料は鋼である。また、鋼心ワイヤロープの充填率は、ほとんど 100%に近く、張力を公称断面積で除すれば、公称応力とみなせる。そこで、応力振幅の代わりに公称応力を縦軸に、繰返し数としてシーブを通過した回数を横軸として、破断寿命を評価した。

結果を図 21 に示す。なお、横軸は対数目盛である。また、S 字曲げ疲労試験では、ワイヤロープが一往復すると、4 個のシーブを通過することから、繰返し数は 4 倍した。図 21 のように、公称応力と繰返し数の間には、鋼心ワイヤロープの種類によらず、非常によい直線関係がある。したがって、ワイヤロープに負荷した張力とシーブを通過した回数（期間）使用できるか、余寿命を評価できる。余寿命が評価できれば、これまでの使用実績と今後の利用予測から、次の定期点検までに破断するかどうか判断できる。最近の移動式クレーンは保守を目的として、巻上ロープに掛かる張力や巻上ドラムの回転数など、詳細な操作履歴を不揮発性メモリーに記録している¹²⁾。これら操作履歴を利用すれば、ワイヤロープの余寿命を評価することは十分可能である。

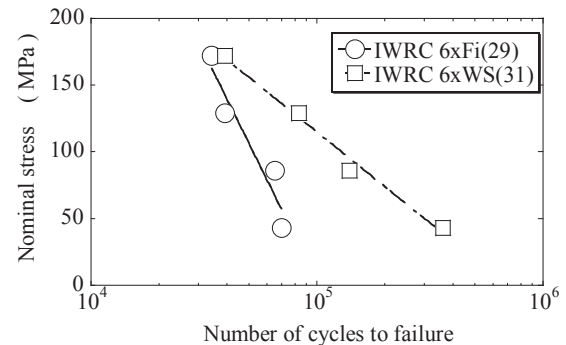


図 21 ワイヤロープの公称応力と破断までの繰返し数の関係

本研究では、ワイヤロープに負荷する張力は一定で疲労試験を行った。実際のクレーンでは、生産ラインに組み込まれた一部の天井クレーンを除き、張力すなわちつり荷の重量が一定していることは稀であり、変動するのが普通である。今後は、ブロック荷重など荷重が変動した場合でもマイナー則など累積損傷則¹³⁾が成立するか確認する必要がある。また、ワイヤロープの疲労損傷には、シーブ径 D とロープ径 d の比 D/d が影響する¹⁴⁾。ワイヤロープの余寿命評価には、今後、異なる D/d での疲労試験を行い、疲労寿命に及ぼす D/d の影響を明らかにする必要がある。

† 実際には、摩耗、腐食、キンクといった他の廃棄基準があるが、最初に断線数が基準に達するため、事実上、断線数のみで廃棄かどうか判断される。

5 ワイヤロープの非破壊損傷評価

5.1 漏洩磁束法による非破壊検査

一般に普及している非破壊損傷評価法の多くは、連続体の中に存在する不連続部を検出する¹⁵⁾。ワイヤロープは細い素線を多数撚り合わせた不連続体であり、このため多くの非破壊検査法が適用できない。その中であって、磁化した際に被検体から漏洩する磁束を検出する漏洩磁束法は、唯一ワイヤロープに適用できる非破壊検査法である。漏洩磁束法は、渦流探傷法と磁粉探傷法を組み合わせた非破壊検査法であり、図 22 に示すように、両端の永久磁石でワイヤロープを磁化する。ワイヤロープに素線の断線があると、そこだけ磁束が外部に漏れる。この漏れた磁束を磁粉の代わりに、中央のコイルで電圧の変化として検出する。検出器としてコイルを使用するため、磁束密度が変化する必要があるため、このため、ワイヤロープと検出器の間に相対速度を与えて測定する。

この方法によれば、磁束がワイヤロープ表面から外に漏れさえすれば、内部断線も検出することができる。そ

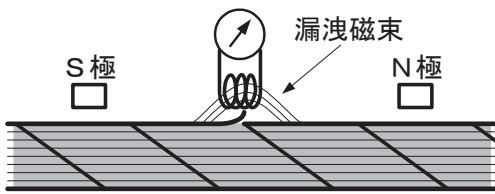


図 22 漏洩磁束法による非破壊検査の原理

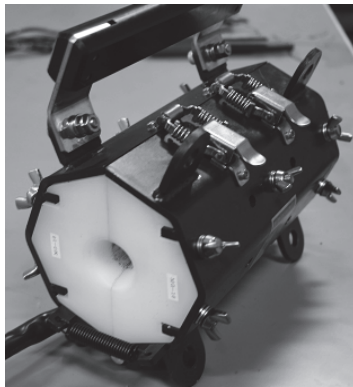


写真 2 検出器の外観

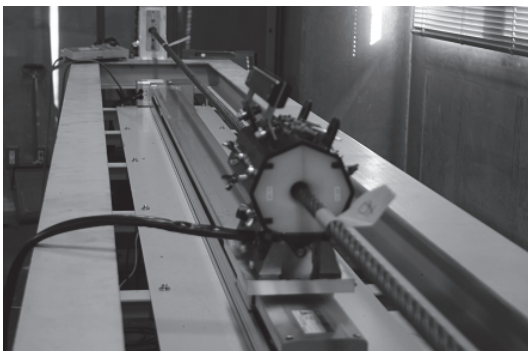


写真 3 ワイヤロープの非破壊検査の様子

こで、漏洩磁束法により、鋼心ワイヤロープの内部断線がどの程度検出できるか検討した。

5.2 検査方法

漏洩磁束法による鋼心ワイヤロープの非破壊損傷評価には、東京製綱株式会社製ワイヤロープテスター MF-550 を使用した。写真 2 に検出器の外観を示す。通常非破壊検査では検出器を固定し、ワイヤロープを走行させるが、本研究ではワイヤロープ試験機の中に検出器を設置する空間がなく、そこで、別途製作したワイヤロープを緊張する枠にロープを固定し、検出器を走行させることで検査を行った。検出器の走行には、ヤマハ発動機株式会社製単軸ロボット B10-L-2000 を使用し、検査対象であるワイヤロープが単軸ロボット上にくるようにワイヤロープを取り付けた。また、非破壊検査時に、ワイヤロープに十分な緊張を与えるために、1.2 kN の錘により荷重を負荷した。測定条件は、単軸ロボットの速度は 15m/min、検出器のサンプリング周波数は 5kHz、最大出力は 4V とした。写真 3 にワイヤロープと検出器を取付けた検査装置の外観を示す。

鋼心ワイヤロープは、IWRC 6×Fi(29)と IWRC 6×WS(31)について、張力 $T = 34.6$ kN で S 字曲げ疲労試験を行い、それぞれ目視で可視断線発生時、4%可視断線検出時および 10%可視断線検出時に疲労試験を中断し、非破壊検査に供した。非破壊検査の後には、ワイヤロープを中央から左右に 1 ピッチ毎 10 箇所、計 20 箇所切断して、各ピッチの素線断線数を計測した。

5.3 検査結果

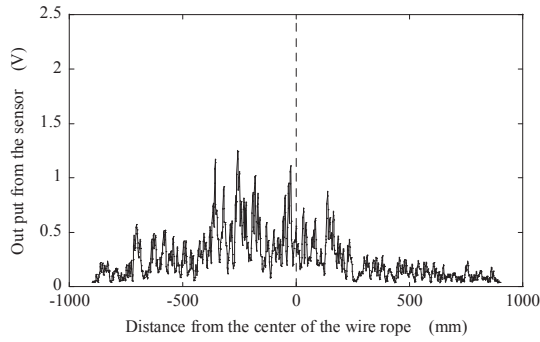
(a) フィラー形鋼心ワイヤロープの非破壊損傷評価

図 23(a)に IWRC 6×Fi(29)の可視断線発生時における非破壊検査の結果を示す。縦軸は検出器の出力電圧であり、横軸は試験体中央からの距離である。また、図 23(b)に、このワイヤロープを素線に分解して得た断線分布を示す。両者を比較すると、分布形状はよく似ている。検出器の最大出力は、250mm 付近で約 1.3V であり、この場所の断線数は、20 本である。

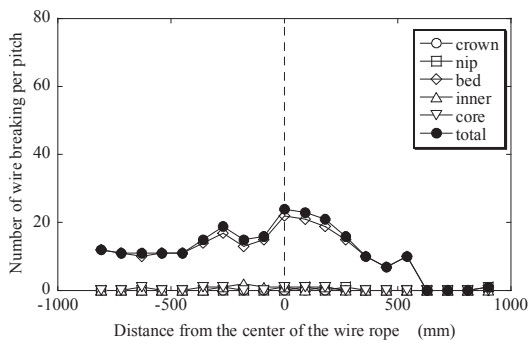
次に、可視断線が 4%発生した時点の検出器の出力と断線数を図 24 に示す。可視断線発生時に比べ検出器の最大出力は 2.5V と約 2 倍になっている。しかし、当該場所における断線数は 24 本とそれほど増えていない。また、200mm～500mm にかけては、局所的な断線のピークは捉えているが、断線数に比べて出力電圧は著しく小さい。図 25 に可視断線が 10%発生した時点の検出器の出力と断線数を示す。総断線数は 4%断線時とあまり変化はないが、検出器の最大出力は 2V 程度にむしろ減少している。このように、断線が局所的に増えると、検出器の出力に鋭いピークが発生する傾向があるが、出力電圧と断線数は比例しない。

(b) ウォリントン・シール形鋼心ワイヤロープの非破壊損傷評価

IWRC 6×Fi(29)の可視断線 4%発生時の検査結果と断

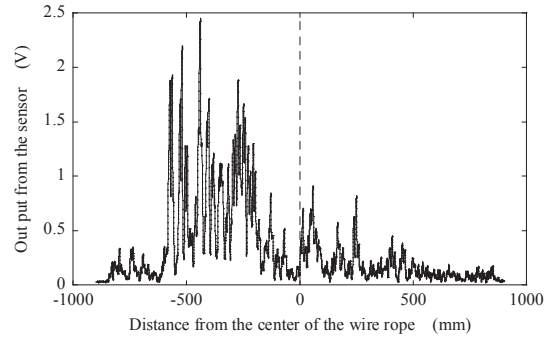


(a) 検出器の出力電圧

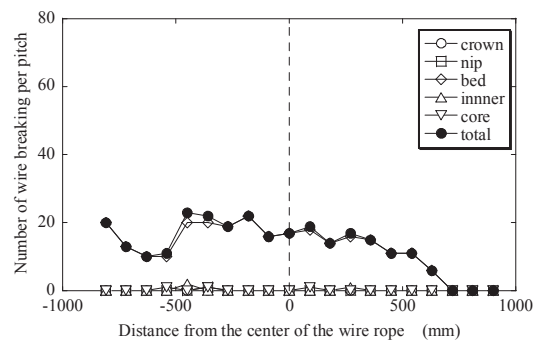


(b) 断線分布

図 23 IWRC 6×Fi(29)の可視断線発生時の検査結果と断線分布

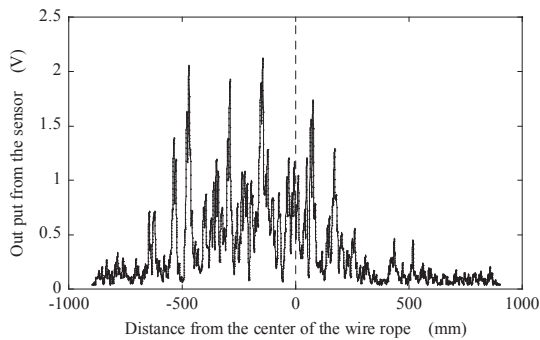


(a) 検出器の出力電圧

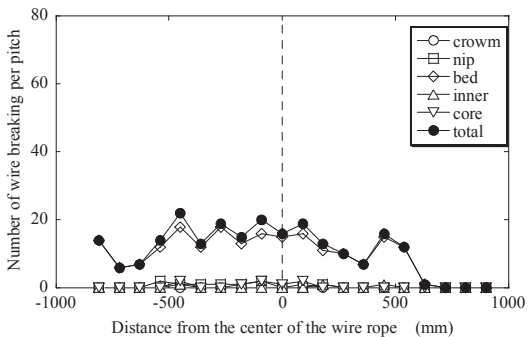


(b) 断線分布

図 24 IWRC 6×Fi(29)の可視断線 10%発生時の検査結果と断線分布



(a) 検出器の出力電圧



(b) 断線分布

図 25 IWRC 6×Fi(29)の可視断線 10%発生時の検査結果と断線分布

線分布可視断線が発生した時点の検出器の出力を図 26(a)に、断線数を図 26(b)に示す。両者を比較すると、ワイヤロープ中央から 100mm の位置にある断線は、検

出器から鋭いピーク出力として得られている。しかし、-500mm および-100mm にある断線は検出されていない。これは 100mm の位置の断線が Nip 断線で、表面から浅い位置の断線なのに対し、-500mm から 0mm の断線が Bed 断線で、表面から最も深く、磁束漏洩量が小さいことが考えられる。

図 27 に可視断線が 4%発生した時点の検出器の出力と断線数を示す。総断線数は増加するが、検出器の最大出力はほとんど変化がない。-500 ~ 200mm の断線が多い区間では、検出器の出力は若干増加するが、最大値は可視断線発生時と変わりなく、断線数に比例しない。

可視断線が 10%発生した時点の検出器の出力と断線数を図 28 に示す。断線数が大幅に増加し、検出器の出力も広範囲に渡って増加する。しかし、図 26 と比べると、断線数が 3 倍以上増加したのに対し、最大出力は 1.1V と 2 倍にも満たない。また、-500mm 付近から 200mm まで、素線はまんべんなく断線しているが、検出器の出力は-400mm 付近の鋭いピークの後、出力は低下し、200mm あたりから断線数が減少するまで、ほとんど変化がない。漏洩磁束法では、磁束の変化率を検出しており、磁束漏洩量そのものを測定していない。このため、断線数が増加するところで出力が大きくなるが、断線数が一定のところでは、磁束の変化量が小さく、出力は小さくなる。したがって、断線数の変化は検出できるが、断線数の絶対数は検出できない。これが、検出器の出力と断線数が比例しない理由である。

このように、漏洩磁束法によるワイヤロープの非破壊

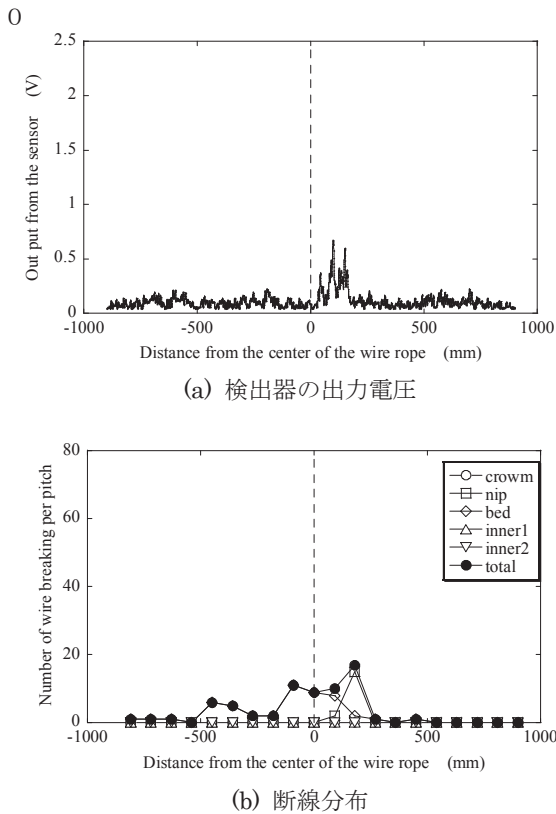


図 26 IWRC 6×WS(31)の可視断線発生時の検査結果と断線分布

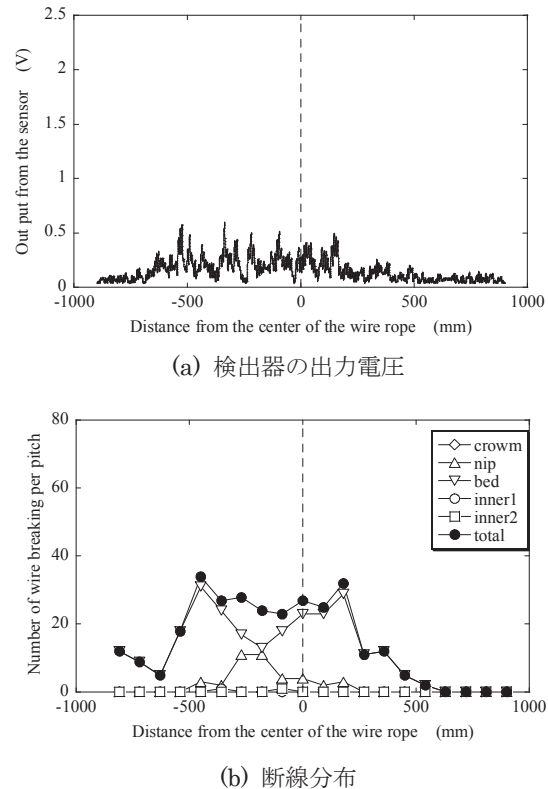


図 27 IWRC 6×WS(31)の可視断線 4%発生時の検査結果と断線分布

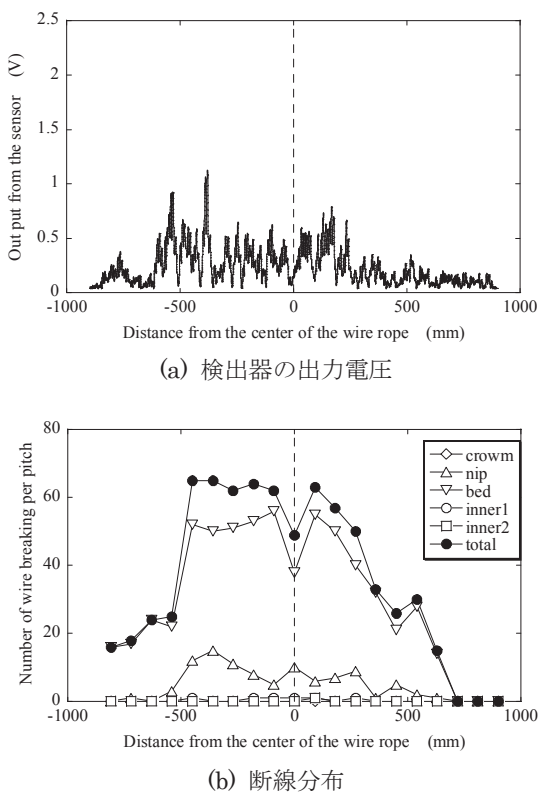


図 28 IWRC 6×WS(31)の可視断線 10%発生時の検査結果と断線分布

検査は、検出器の出力が断線数の変化するところで大きく、断線数に比例しないこと、Bed断線のようにワイヤロープの表面から深い位置の内部断線は、比較的浅い位

置のNip断線に比べて検出しにくいことから、断線箇所を特定することはできても、断線数を定量的に評価することは難しいといえる。

6 おわりに

クレーンに使用される動索の廃棄基準見直しを目的として、動索として一般的に使用される2種類の鋼心ワイヤロープ、IWRC 6×Fi(29)とIWRC 6×WS(31)のS字曲げ疲労試験と引張試験を行った。一定数の可視断線が発生した時点で総断線数を調べるとともに、疲労損傷した鋼心ワイヤロープの破断強度を調査することで、現在の廃棄基準である素線の断線数による損傷評価は、危険側の評価になることを明らかにした。そこで、断線数に変わる損傷評価法として、ワイヤロープに負荷した張力とシーブ(滑車)を通過した回数、すなわちワイヤロープの使用履歴から余寿命を評価する方法を提案した。最近のクレーンは、操作履歴を記録できるものが多い。定期点検の際に、操作記録からワイヤロープに掛かった張力とシーブを通過した回数を求めることは十分可能である。

また、ワイヤロープの定期点検では、目視検査が一般的であり、検査精度は検査者の技能に依存する。そこで、目視に代わる検査方法として、漏洩磁束法による非破壊検査法を適用したが、素線の断線は検出できるが、断線数の定量的評価は難しいことが判明した。

参考文献

- 1) クレーン構造規格, 厚生労働省, 2003.
- 2) 田中正清, ワイヤロープの内部損傷と問題点, Safety

- Engineering, Vol.17 No.4 (1991), pp6 - 10.
- 3) 例えば, 東京都葛飾区内で発生した移動式クレーンのワイヤロープ破断に係る鑑定嘱託, 労働安全衛生総合研究所 (2008) .
 - 4) ISO 4309:2010 Cranes - Wire ropes - Care and maintenance, inspection and discard.
 - 5) JIS B8836:2007 クレーン—ワイヤロープ—取扱い, 保守, 取付け, 検査及び廃棄, 日本規格協会.
 - 6) 東京製綱株式会社ホームページ <http://www.tokyoropeco.jp/product/wire rope/outline.html> (平成 26 年 8 月 1 日 URL 確認) .
 - 7) 例えば, 材料力学, 竹内洋一郎, 日新出版 (1969), pp139-142.
 - 8) 例えば, 弾性力学, 村上敬宣, 養賢堂 (1985), pp162-163.
 - 9) 橘内良雄, Ganesh Sundara Raman, S., Kamara, M., ワイヤロープ用鋼および SNCM439 鋼のフレッキング疲労挙動, 産業安全研究所特別研究報告, NIIS-SRR-No.18 (1999), pp35-43.
 - 10) 破壊力学, 小林英男, 共立出版 (1993), pp137-146.
 - 11) 例えば, 材料強度学, 大南正瑛編, 日本材料学会 (1986), pp92-98.
 - 12) JCAS 2208:2013, 移動式クレーンに装備する作業記録装置の要求事項の指針, 日本クレーン協会.
 - 13) 例えば, 材料強度学, 大南正瑛編, 日本材料学会 (1986), pp115-123.
 - 14) 田中正清, IWRC ワイヤロープの内部損傷促進因子について—第 1 報 D/d の影響—, 資源・素材 '95, ワイヤロープ資料 (1996), pp165-167.
 - 15) 非破壊検査マニュアル, 仙田富男編, 日本規格協会 (1980), pp.13-59.