

ワイヤロープ損傷検出による寿命および残存強度予測[†]

緒方公俊^{*1}, 山際謙太^{*1}, 佐々木哲也^{*1}

ワイヤロープは複数の素線の撓り合わせからなる。ワイヤロープに引張荷重や曲げ荷重が繰り返し加わることで素線が徐々に断線し、最終的にはワイヤロープが破断する。そのため、素線断線を検出し、適切なタイミングでワイヤロープを交換または廃棄することが求められる。本研究では、ワイヤロープの素線断線の非破壊検査技術として期待されている漏洩磁束法を用いた検出手法について、ワイヤロープ損傷検査の適用範囲や定量評価の実用可能性を検討した。当研究所で所有する疲労試験機に漏洩磁束法による検出器を取り付けてワイヤロープの疲労試験を実施し、素線断線と検出器の信号出力の相関関係を分析した。その結果、疲労試験の繰り返し数の増加に伴い、信号出力が単調増加する傾向が確認された。素線断線数が廃棄基準に近いロープでは、信号出力と素線断線数から算出したロープの断面積減少率との相関が低下し、素線断線の定量評価が難しいことを示した。一方で、素線断線が少なく断面積減少率が5%未満のロープでは、断面積減少率と信号出力は線形性を有し、素線断線の定量的推定が可能であることを示した。

キーワード ワイヤロープ、非破壊検査、漏洩磁束法、素線断線、疲労寿命。

1. はじめに

ワイヤロープはクレーンをはじめ、さまざまな産業機械に使用されている一方で、ワイヤロープの破断による労働災害が後を絶たない。シープを繰り返し通過するワイヤロープには、曲げ荷重が繰り返し負荷されることで素線が徐々に断線していき、最終的にワイヤロープの破断に至る。ワイヤロープの破断を防止するために、定期的な検査を実施し、表面に見える素線断線（可視断線）数やロープ直径の減少をチェックし、JIS B8836¹⁾、ISO 4309²⁾が定める廃棄基準に達している場合には交換することが一般的には行われている。しかし、当研究所のこれまでの研究³⁾によってIWRC（鋼心）ワイヤロープでは、可視断線ではなく内部の素線破断（不可視断線）が先行することが明らかになっており、表面の目視検査のみではワイヤロープの交換時期の適切な判断が難しいことが示唆された。また、目視検査は検査者の経験や技術に依存し、断線箇所の見落としも考えられる。

素線断線の検査手法として、漏洩磁束法を用いた素線断線の非破壊検査技術の確立が期待されており、これまで多くの研究によりその有効性が検討してきた^{3)~5)}。当研究所のこれまでの研究³⁾においても、素線断線が複数発生したワイヤロープについて、漏洩磁束法による断線有無の検出が可能であることが示された。一方で、素線断線数の定量的な評価に関する検討や、残存強度との相関についての研究は十分に行われていない。

本研究は、漏洩磁束法によるワイヤロープの断線検出の汎用装置であるワイヤロープテスターを用いて、ワイヤロープの内部断線を含む非破壊検査手法を検討した。

具体的には、当研究所が所有するワイヤロープの疲労試験機を用いて、素線断線を有する損傷ロープを作成した。疲労試験機にワイヤロープテスターを設置し、試験時

のテスタ出力を計測した。損傷ロープの分解調査によって、ロープを構成する各素線の断線状態を取得し、引張試験によって損傷したワイヤロープの残存強度を計測した。得られたテスタ出力、断線状態、残存強度の関係を解析し、ワイヤロープテスターによる損傷状態の定量評価の可能性と実用性、今後の課題を考察した。

2. ワイヤロープの疲労試験と断線検出

1) 試験構成

本研究では、国内のクレーン用ワイヤロープとして広く使用されているIWRC 6×Fi(29) B種 o/oを用いた。ロープの公称径 d は16 mmである。図1にIWRC 6×Fi(29)の断面模式図を示す。鋼心であるIWRC（Independent Wire Rope Core）は7本撓りのストランドで構成されており、その外周にフィラー型ストランドFi(29)が撓り合わされている。これにより、ロープ全体はIWRCを中心にしてFi(29)が撓り合わさった構造となっている。Fi(29)のストランドは、14本の外層素線（Outer）、7本の内層素線（Inner）、1本のコア素線（Core）と7本のフィラー素線（Filler）の計29本の素線で構成される。

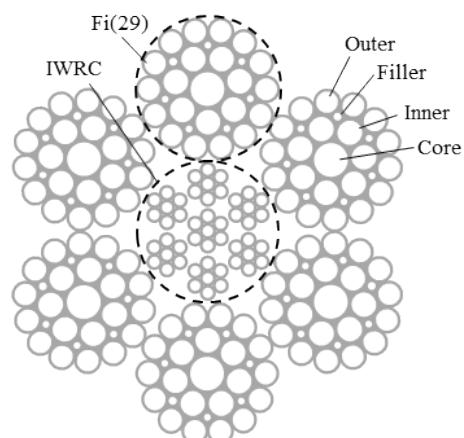


図1 IWRC 6×Fi(29)の断面模式図

*1 労働安全衛生総合研究所 機械システム安全研究グループ

連絡先：〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6

機械システム安全研究グループ 緒方公俊

E-mail: ogata@s.jniosh.johas.go.jp

ワイヤロープの疲労試験には、当研究所が所有する往復駆動型ワイヤロープ試験機を用いた。試験機に設置したテストシープにワイヤロープを取り付け、油圧アクチュエータにより任意の張力を負荷しながらワイヤロープを往復動させた。図 2 に疲労試験機のテストシープとワイヤロープの位置関係を示す。ワイヤロープは 2 つのテストシープ間を S 字になるよう通過することにより両曲げの荷重が繰り返し負荷される。テストシープの直径 D は、ロープ径 d との比 D/d が 16 となるように $D=256$ mm とし、2 つのテストシープの中心軸間の距離を D とした。

図 2 に示すようにテストシープから少し離れた位置にワイヤロープテスターを設置し、テスター出力を測定した。図 3 にワイヤロープテスターの疲労試験機への設置状況を示す。ワイヤロープテスターには、東京製鋼株式会社製のワイヤロープ断線検出装置 MF550 を用いた。MF550 は装置両端の永久磁石によってワイヤロープを磁化し、素線断線によって生じる漏洩磁束を装置中央の検出コイルによって検出し、電圧値として出力する³⁾。図 2、図 3 に示す試験構成により、疲労試験中のワイヤロープがテスター内を通過し、その時のテスター出力を測定できる。

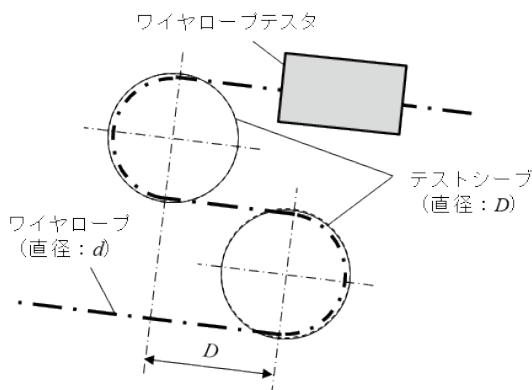


図 2 テストシープ、ワイヤロープテスターとワイヤロープの位置関係

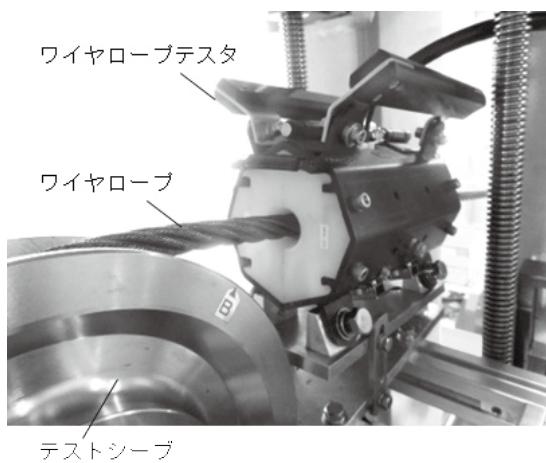


図 3 ワイヤロープテスターの設置状況

2) 試験条件

ワイヤロープテスターの検出部にはコイルを用いているため、出力値はテスターを通過するワイヤロープの速度の影響を受ける。ワイヤロープの速度を一定にするため、振幅 800 mm の三角波でワイヤロープを位置制御した。試験速度は 1 分間で 10 往復とした。これにより、ワイヤロープは 32 m/min の一定速度で往復動する。ワイヤロープの位置データとワイヤロープテスターの出力データを同期することで、10 往復ごとに 1 回、1 往復分のテスター出力を測定した。サンプリング周波数は 1000 Hz とし、ロープ位置 1 mm ごとのテスター出力値となるように平均処理した。なお、疲労試験時の繰り返し数について、本研究ではワイヤロープの 1 往復を 1 回 (1 サイクル) としてカウントした。

疲労試験によってワイヤロープに生じる素線断線とワイヤロープテスターの出力の関係を評価するため、ロープの破断前に疲労試験を停止した。表 1 に本研究で取得した疲労試験のロープ張力と試験停止時の繰り返し数 (以下、中断回数) を示す。ワイヤロープの張力は、34.6 kN を最大として、25.95 kN, 17.3 kN, 8.65 kN の 4 水準を設定した。34.6 kN は、IWRC 6×Fi(29) の規格破断力 173 kN¹⁾ に対する安全率 5 の張力である。これは、クレーン用ロープとして許容できる最大張力である⁶⁾。事前に取得した一定張力のワイヤロープ S 曲げ疲労試験の破断寿命データをもとに中断回数を設定した。また、目視検査で廃棄基準に到達するまでの疲労試験も各張力で実施した (Sf05-dis, Sf10-dis, Sf15-dis, Sf20-dis)。これらの疲労試験については、ロープ表面の素線が断線により飛び出し、ワイヤロープテスターを損傷させる恐れがあったため、試験中はテスターを取り外し、計測は実施しなかった。

疲労試験後のワイヤロープの素線断線状態と残存強度の相関を分析するため、表 1 に示す条件の試験をそれぞれ 2 回ずつ実施し、1 本を分解調査による素線断線評価、もう 1 本を引張試験による残存強度計測に用いた。なお、廃棄基準到達時のワイヤロープについて、表 1 の左側の回数が残存強度用、右側の回数が分解調査用のワイヤロープの中断回数である。

疲労試験停止後、ワイヤロープを試験機から取り外し、分解調査用に小片化した。図 4 にワイヤロープの切り出し位置を示す。2 つのテストシープを完全に通過する S 曲げ領域中央を基準に $6d$ (96 mm) の長さでワイヤロープを切断した。ここで $6d$ はワイヤロープ 1 摺りの長さ (約 1 ピッチ) に相当する。JIS B 8836, ISO 16625 では、 $6d$ ないし $30d$ の長さの範囲内の素線断線数によって廃棄基準を定めている^{1), 2)}。図 4 に示すようにワイヤロープの中央部から右側の分解調査サンプルを順に R-1, R-2, R-3..., 左側のサンプルを順に L-1, L-2, L-3...とした。

ワイヤロープテスターの設置位置により、ワイヤロープ中央部から R 側がテスターで測定できた領域である。そこで、R-1 から R-8 のサンプルの分解調査とテスター出力との関係を評価した。

表 1 ワイヤロープの張力と中断回数

試験 ID	ロープ張力 (kN)	中断回数 (cycle)
Sf05-15	34.6	1500
Sf05-30		3000
Sf05-dis		6000 / 5600
Sf10-20	25.95	2000
Sf10-40		4000
Sf10-60		6000
Sf05-dis		6500 / 6900
Sf15-25	17.3	2500
Sf15-50		5000
Sf15-75		7500
Sf05-dis		8500 / 8300
Sf20-45	8.65	4500
Sf20-90		9000
Sf05-dis		13000 / 12000

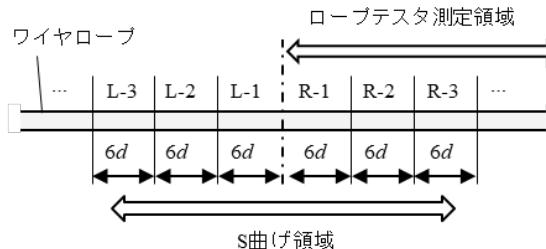


図 4 ワイヤロープの切り出し位置

3) ワイヤロープの分解調査

図 4 に示すようにワイヤロープを小片化したサンプルそれぞれについて、分解調査を実施した。各分解調査サンプルのストランド及び素線を 1 本ずつ取り外していく、図 1 に示す素線の種類ごとに素線断線本数を取得した。また、得られた断線本数に素線の断面積を掛け合わせ、それらの総和を取ることでロープ断面の減少面積を計算した。この減少面積とロープの総断面積の比を計算し、ロープの断面積減少率を算出した。

4) ワイヤロープテスタの出力分析

図 5 に Sf15-75 のロープ位置とワイヤロープテスタの出力の関係を示す。ロープ位置については分解調査サンプルの長さに合わせて 96 mm ごとに補助線を引いた。試験初期の 100 サイクルと、最終サイクルの 7500 サイクルのテスタ出力を破線で示す。試験開始直後の数サイクルでは、ワイヤロープの初期伸びなどの影響によってテスタ出力が不安定であった。そこでテスタ出力が安定し、かつ断線の発生していないと判断できる試験初期の 100 サイクルの結果を未断線時のテスタ出力として用いた。7500 サイクルの結果から、複数のテスタ出力のピークが確認でき、これらのピーク位置で素線断線が生じていると考える。一方で、未断線である 100 サイクルにおいて

も、0.3V 程度のピークがあることがわかる。これは、素線やストランドの撚り構造によって生じる漏洩磁束をテスタが検出しているためである⁴⁾。この影響を除去するため、試験初期の出力との差分を取ることを試みた。図 5 に 7500 サイクルと 100 サイクルの差分値を出力した結果を実線で示す。

各サンプル (R-1, R-2, ...) の分解調査結果と、テスタ出力の関係を取得するため、以下に示すように各サンプルに対応するロープ位置範囲におけるテスタ出力の平均値 V_{out} を出力した。

$$V_{out} = \frac{\sum_{i=1}^N |f(x_i)|}{N} \quad (1)$$

ここで、 $f(x_i)$ はロープ位置 x_i におけるテスタ出力、 N はデータ点数である。(1)式は、ロープ位置の分解能 Δx 、ロープ位置の評価範囲 L を用いて以下となる。

$$V_{out} = \frac{\sum_{i=1}^N |f(x_i)| \Delta x}{N \Delta x} = \frac{\sum_{i=1}^N |f(x_i)| \Delta x}{L} \quad (2)$$

つまり、 V_{out} はテスタ出力の積分値を積分範囲 L で割った値となる。本研究では、各試験のテスタ出力に対して、分解調査サンプル 1 本分の $L=6d$ と、3 本分の $L=18d$ としたときの V_{out} とロープの断面積減少率の関係を評価した。なお、 $L=18d$ のときの断面積減少率は、対応する分解調査サンプル 3 本の平均値とした。

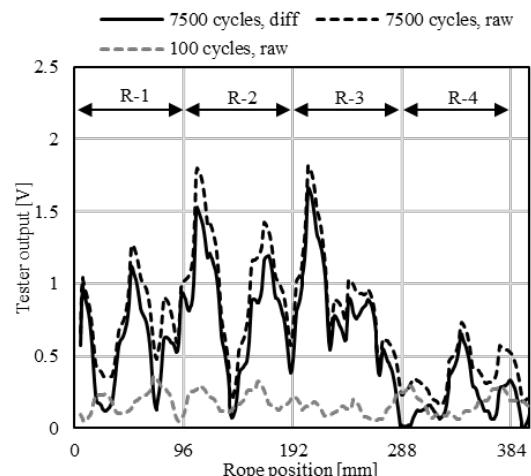


図 5 ワイヤロープテスタ出力結果 (Sf15-75)

5) ワイヤロープの残存強度計測

表 1 に示す疲労試験後のワイヤロープを用いて引張試験を実施した。図 4 に示す S 曲げ領域が中央となるように 2.35 m の長さにワイヤロープを切り出し、引張試験機によって引張強度（残存強度）を計測した。また、疲労試験前の新品ワイヤロープについても同様の引張試験を実施し、引張強度を計測した。疲労試験後のワイヤロープの残存強度と疲労試験前の引張強度の比を求め、残存強度比を計算した。

3. 試験結果と考察

1) 分解調査結果とワイヤロープテスターの出力結果

図 6～図 9 に疲労試験後の分解調査結果とワイヤロープテスターの出力結果を示す。それぞれロープ張力 34.6 kN (図 6), 25.95 kN (図 7), 17.3 kN (図 8), 8.65 kN (図 9) の試験結果であり、各図の(a)は Fi(29)ストランドの素線断線本数、(b)は IWRC の素線断線本数、(c)はロープの断面積減少率の結果である。(d)は各試験ロープの最終サイクルにおけるテスター出力の差分結果である。

各図の(a)に示す Fi(29)ストランドの素線断線本数と、(b)に示す IWRC の素線断線本数とともに S 曲げ領域であるロープ中央部の R-1, R-2, R-3 の断線が多く、ロープ中央部から離れるほど断線数が減少する。また、各図の(a)の Fi(29)ストランドと(b)の IWRC の素線断線本数を比較すると、IWRC の素線断線数の方が多い。ここで、素線の種類ごとの断線状態を別途観察した結果、Fi(29)ストランドでは、コア素線の断線が多く、次いで外層素線の断線が多い傾向にあった。IWRC の素線断線の大部分は、最外層の素線断線であった。各図の(a)～(c)内の素線断線と中断回数との関係に着目すると、中断回数が増加するにつれて素線断線本数、ロープの断面積減少率とともに急激に増加する非線形性を有することがわかる。各図(a)～(c)の素線断線の結果と(d)のテスター出力の結果から、断線数が多いほどテスター出力が大きい傾向にあることがわかる。

ここで、JIS B 8836 によれば、「素線断線数の廃棄基準は、1 よりの長さ (約 6d の長さ) において、素線 (フィラーライン及び鋼心入りの鋼心を除く) の数の 10%以上の素線断線数とする。」とある¹⁾。本研究対象の IWRC 6×Fi(29)の対象となる素線数は 132 本であり、その 10% の 13.2 本以上、つまり 14 本以上の素線断線数が廃棄基準となる。図 6～図 9(a)に示す Fi(29)ストランドの素線断線本数に着目すると、目視検査での廃棄基準に到達したロープ (Sf5-dis, Sf10-dis, Sf15-dis, Sf20-dis) はすでに総素線数で規定される廃棄基準の断線本数 14 本を超えていることがわかる。また、張力が小さいほど素線断線数は多い傾向にある。つまり、総素線数で規定される廃棄基準との乖離が大きくなり、目視検査は危険側の評価になることがわかる。

目視検査での廃棄基準に到達したロープ (Sf5-dis, Sf10-dis, Sf15-dis, Sf20-dis) 以外では、図 8(a)に示すロープ張力 17.3 kN, 中断回数 7500 回 (Sf15-75) の R-3 の素線断線本数が 14 本で廃棄基準に達していた。また、Sf15-75 の R-1, R-2, 図 7(a)に示すロープ張力 25.95 kN, 中断回数 6000 回 (Sf10-60) の R-1, R-2, 図 9(a)に示す張力 8.65 kN, 中断回数 9000 回 (Sf20-90) の R-2 の断線本数が 12～13 本と廃棄基準直前であった。これらの廃棄基準に到達もしくは到達直前のロープの断面積減少率は各図の(c)に示すように 17%～20% であった。また、素線断線は認められたが廃棄基準に対して余裕のあったロープの断面積減少率は 10%未満であった。

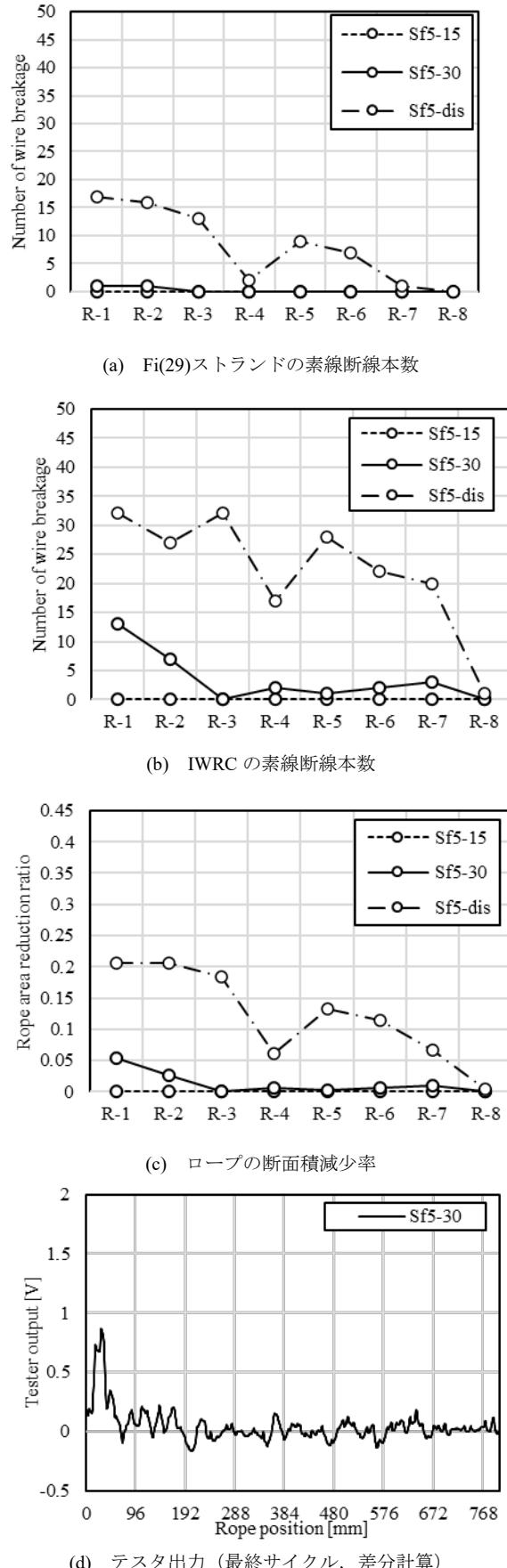
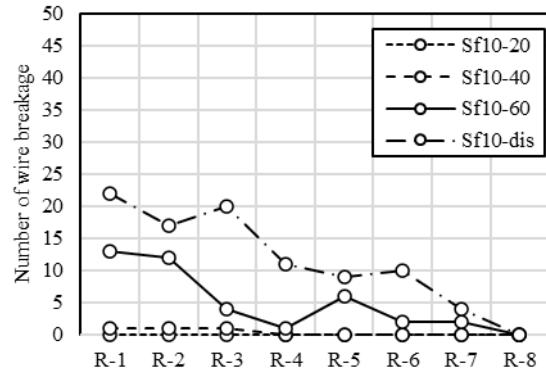
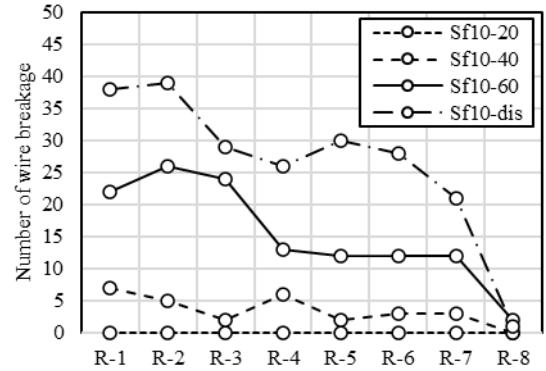


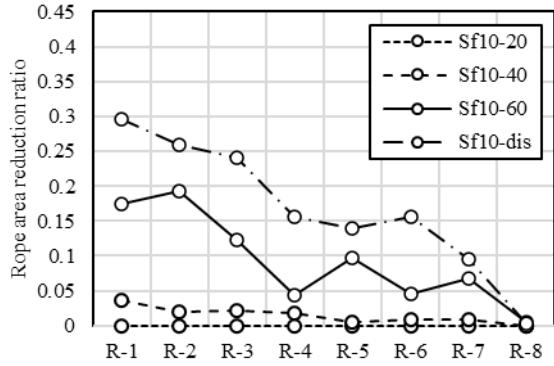
図 6 ロープ張力 34.6 kN の分解調査とテスター計測結果



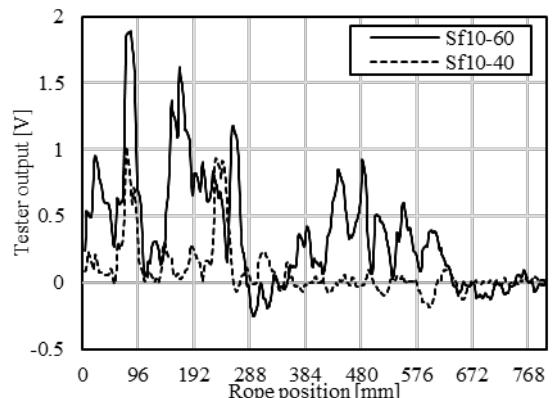
(a) Fi(29)ストランドの素線断線本数



(b) IWRC の素線断線本数

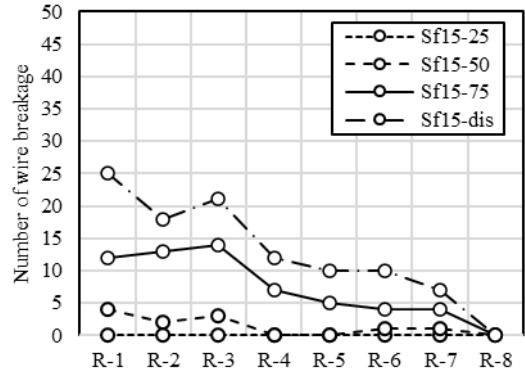


(c) ロープの断面積減少率

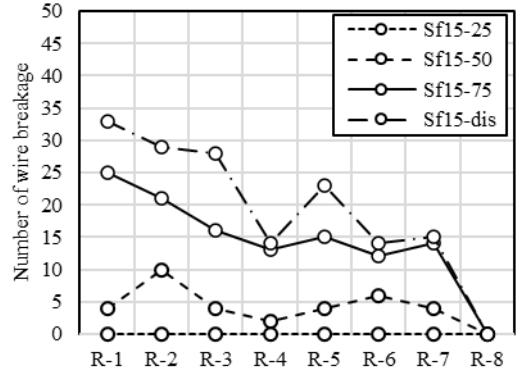


(d) テスター出力 (最終サイクル, 差分計算)

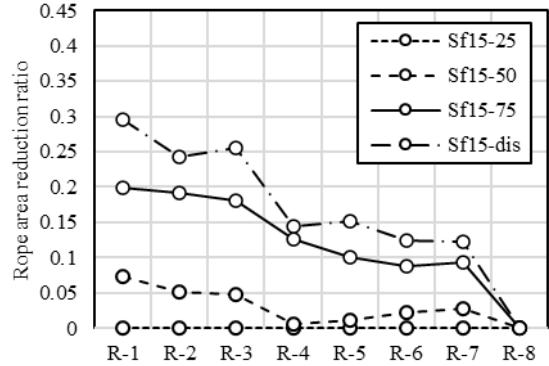
図 7 ロープ張力 25.95 kN の分解調査とテスター計測結果



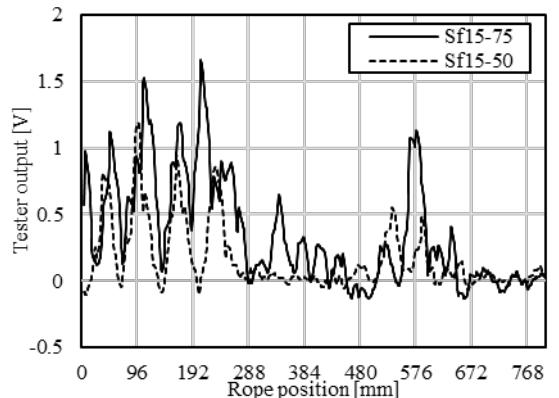
(a) Fi(29)ストランドの素線断線本数



(b) IWRC の素線断線本数



(c) ロープの断面積減少率



(d) テスター出力 (最終サイクル, 差分計算)

図 8 ロープ張力 17.3 kN の分解調査とテスター計測結果

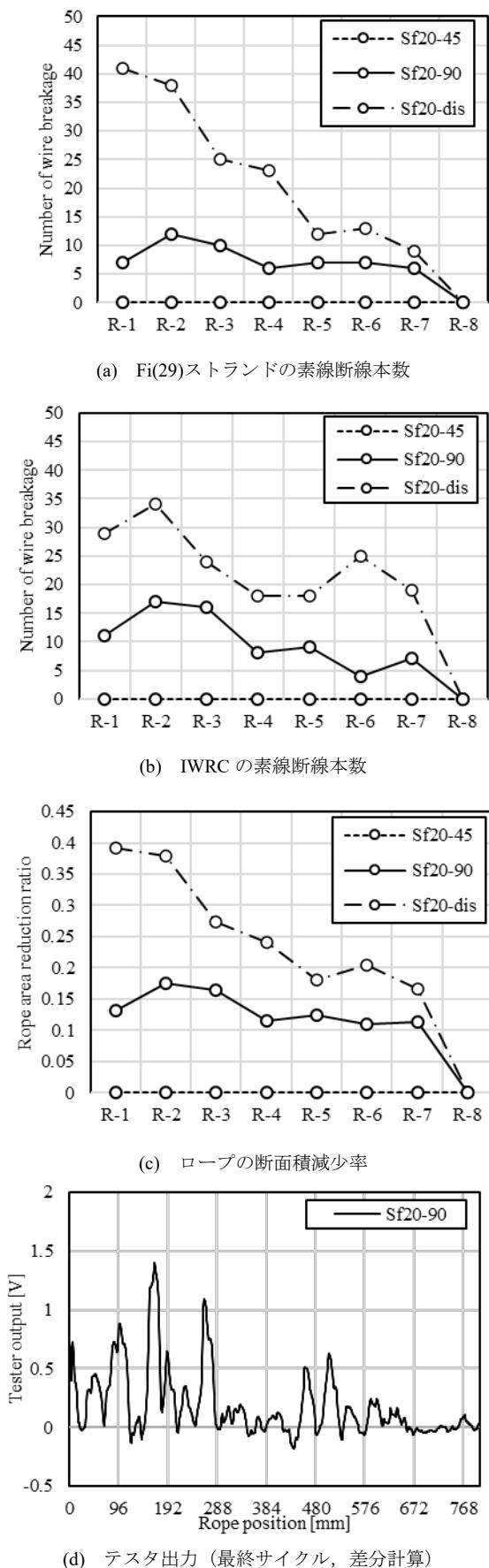


図 9 ロープ張力 8.65 kN の分解調査とテスタ計測結果

2) ロープ断面積減少率と残存強度の関係

分解調査によって得られたロープの断面積減少率と引張試験によって得られた残存強度率の関係を図 10 に示す。残存強度率が 0.6 以上の領域では、図に点線で示すようにロープ断面積減少率と線形関係にあることがわかる。総断線数での廃棄基準におけるロープ断面積減少率は 17%~20% であることから、この領域においてはロープ断面積減少率から残存強度率を推定できる。

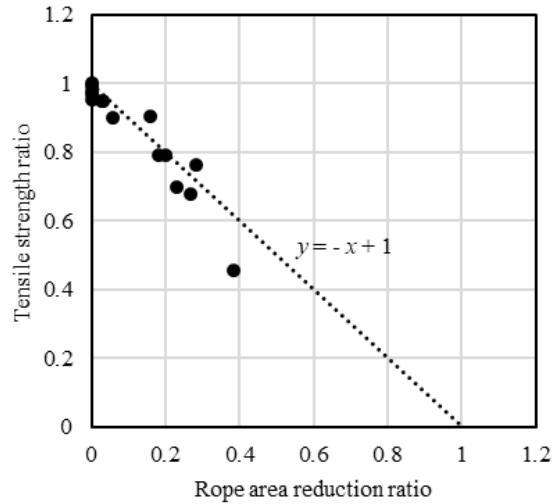
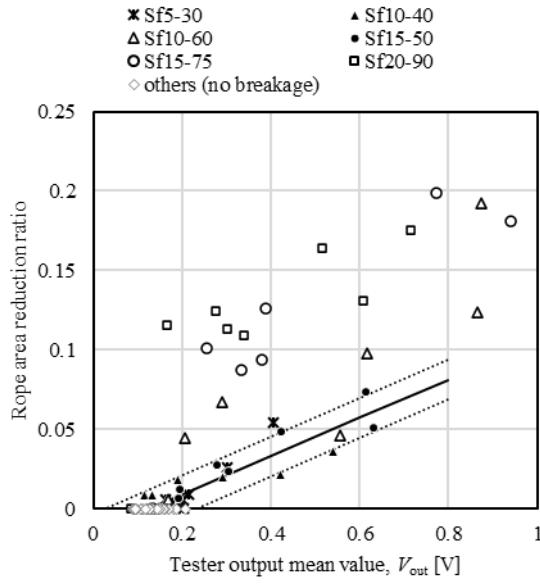
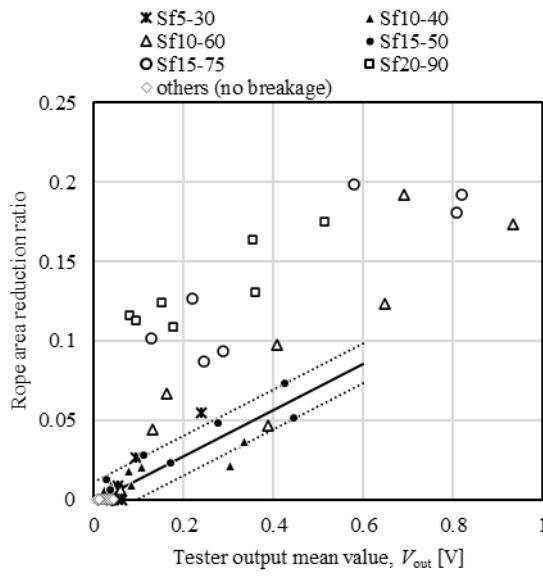


図 10 ワイヤロープの残存強度と断面積減少率の関係

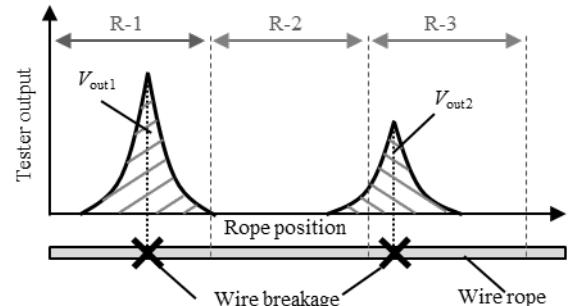
3) テスタ出力と断面積減少率の関係

図 11、図 12 に各分解調査サンプルについて、(1)式で計算した最終サイクルにおけるテスタ出力の平均値 V_{out} とロープの断面積減少率の関係をプロットした。図 11 は最終サイクルのテスタ出力から V_{out} を計算した結果（差分なし）、図 12 は疲労試験初期のテスタ出力との差分を用いて V_{out} を計算した結果（差分出力）である。両者ともテスタ出力の平均範囲 L は分解調査サンプル 1 本分の長さの $6d = 96$ (mm)とした。分解調査の結果から、廃棄基準相当の素線断線が生じていた試験ロープである Sf10-60, Sf15-75, Sf20-90 の結果は白抜きで、断線は認められたが廃棄基準に対して余裕のあったロープの Sf5-30, Sf10-40, Sf15-50 は黒色で、断線が観察されなかつたそれ以外のロープについては灰色の白抜きでプロットした。

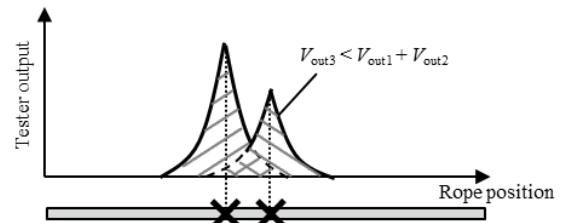
図 11、図 12 より、素線断線数が少なく廃棄基準に対して余裕のあったロープについては、図中の実線で示す回帰直線に示すように V_{out} とロープの断面積減少率に線形性があることがわかる。ここで、回帰直線と実測値との差分から計算した標準偏差 σ を用いて、 2σ の範囲を点線で示した。ばらつきはあるものの、素線断線数が小さいロープでは、ロープの断面積減少率を V_{out} から定量的に推定できると考える。

図 11 V_{out} と断面積減少率の関係 (差分なし, $L = 6d$)図 12 V_{out} と断面積減少率の関係 (差分出力, $L = 6d$)

素線断線が廃棄基準に近いロープについては、回帰直線よりも上側にプロットされる。これは、素線断線が増加すると、ロープの断面積減少率に対して V_{out} の感度が低くなることを意味する。この要因について、図 13 を用いて考察する。ワイヤロープテスターの出力は、素線断線位置付近をピークに山状の波形となる。図 13(a)に示すように各断線の位置が離れている場合、それぞれのテスター出力波形の重なりが小さいため、(2)式に示すテスター出力の積分値である $V_{\text{out}1} + V_{\text{out}2}$ とロープの断面積減少率に線形性が生じると考える。一方で、図 13(b)に示すように各断線の位置が接続すると、両者のテスター出力波形の重複が生じる。この波形の重なりの領域が単純な線形形では表現できないため ($V_{\text{out}3} < V_{\text{out}1} + V_{\text{out}2}$)、断面積減少率が増加してもテスター出力が図 13(a)のときよりも増加



(a) 素線断線同士が離れている場合



(b) 素線断線同士が隣接している場合

図 13 2つの素線断線位置とテスター出力波形の関係

しなかったと考える。素線断線数が少ない場合は、図 13(a)に示すように断線同士が十分に離れている場合が多く、素線断線が増加するにつれて図 13(b)に示すように断線同士が隣接する領域が増加したため、断面積減少率と V_{out} との線形性が失われたと考える。素線断線数が廃棄基準近くまで増加したときのセンサ出力との相関関係の検証は今後の課題である。

素線断線が生じていないロープの結果 (others) に着目すると、図 11 の差分なしの場合、 V_{out} の範囲が 0.09～0.21 になるのに対し、図 12 の差分出力の場合は 0.01～0.05 とばらつきが小さくなることがわかる。これは、ストランドや素線構造によるテスター出力のノイズ成分を除去した効果であり、差分出力を用いることで SN 比が向上し、素線断線の検出能力が向上すると考える。

図 14、図 15 にテスター出力の平均範囲 L を $18d$ としたときの結果を示す。図 14 は差分なしの結果、図 15 は差分出力の結果である。 $L = 6d$ の結果と比較すると、平均範囲 L を大きくすることで、実線で示す回帰直線のばらつきが小さくなることがわかる。この要因の 1 つに分解調査サンプル内の素線断線位置の影響があると考える。図 13(a)の R-3 に示すようにサンプルの切断位置近くに素線断線がある場合、テスター出力の裾野の成分が隣のサンプル (R-2) の領域内に入ってしまう。そのため、R-3 の領域におけるテスター出力の積分値 V_{out} は、実際よりも過小評価 ($V_{\text{out}} < V_{\text{out}2}$) し、素線断線の生じていない R-2 については、過大評価してしまう。これにより、 V_{out} とロープの断面積減少率の関係のばらつきが大きくなつたと考える。この影響は積分範囲を広くすることで低減可能であり、図 14、図 15 に示すように $L = 18d$ と大きくすることでばらつきを低減できたと考える。また、素線

断線が生じていないロープの結果(others)に着目すると, V_{out} の範囲は, 図 14 の差分なしの場合で 0.1~0.18, 図 15 の差分出力を考慮した場合は 0.01~0.03 と, 両者とも平均範囲 L を大きくすることでノイズを低減できることがわかる。

図 15 のロープの断面積減少率が大きい中空のプロットに着目すると, 同じ断面積減少率であってもロープの張力が大きいほど, V_{out} の値が大きい傾向にあることがわかる。ロープ張力が大きいほど素線断線部の開口変位が大きくなることで, テスター出力が大きくなつたと考える。テスター出力に及ぼすロープ張力の影響を明らかにし, テスター出力を補正することでロープの断面積減少率の推定精度の向上が期待できる。

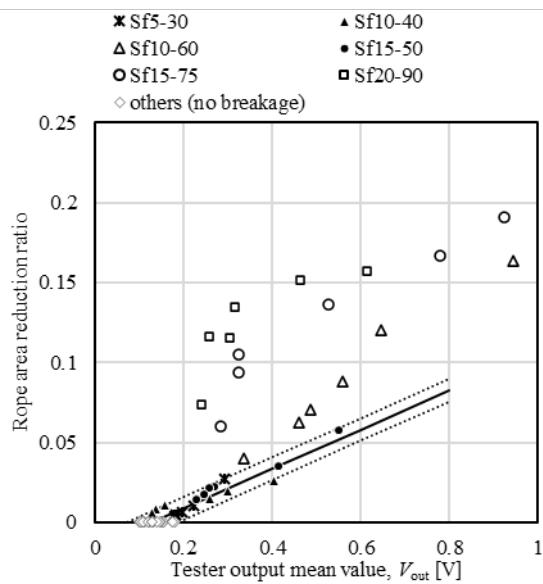


図 14 V_{out} と断面積減少率の関係 (差分なし, $L = 18d$)

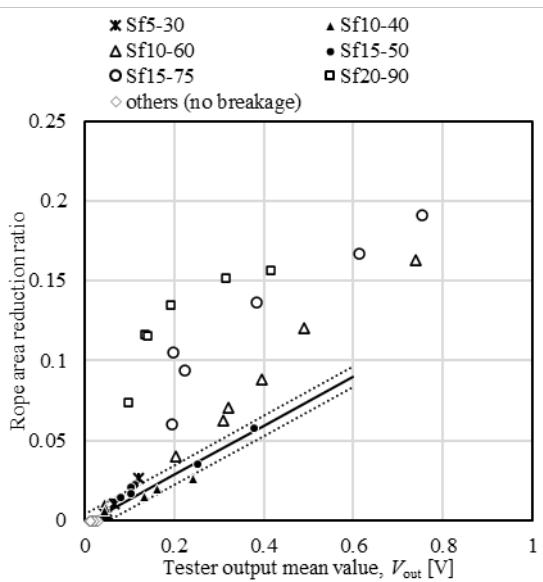


図 15 V_{out} と断面積減少率の関係 (差分出力, $L = 18d$)

図 16 にロープ張力 17.3 kN の疲労試験について, テスター出力の平均値 V_{out} が繰り返し数によって変化する様子を示す。中断回数 5000 回の結果 (Sf15-50) を黒色の実線で示し, 中断回数 7500 回の結果 (Sf15-75) を灰色の実線で示す。ここで, V_{out} はテスターの差分出力を用いて平均範囲は R-1~3 の $L = 18d$ における計算結果を示した。3000 サイクルを過ぎたところで V_{out} が不連続に増加し, 4000 サイクルを過ぎたところで急増していることがわかる。図 8(c)に示す分解調査結果から, 5000 サイクル (Sf15-50) の R-1~3 のロープの断面積減少率の平均は 0.06, 7500 サイクル (Sf15-75) では 0.19 と 3 倍以上に増加している。一方で, V_{out} については, 5000 サイクルで 0.381, 7500 サイクルで 0.752 と約 2 倍の増加である。前述したようにロープの断面積減少率が大きくなるにつれて V_{out} の出力感度が小さくなることが図 16 に示す結果からもわかる。ここで, 図 15 の回帰直線の結果からロープの断面積減少率が 5%となる V_{out} は 0.34 である。したがって, 図 16 に示すような時系列のデータを得ることができれば, 図 16 の破線で示すように断面積減少率が 5%に到達した時期を定量的に推定することができる。さらに, 図 16 に示すように繰り返し数の増加に対して V_{out} が単調増加傾向にあることから 5%に到達してからの経過時間と V_{out} の値からロープの損傷を定性的に評価することは可能である。つまり, ロープの交換時期の判断や, 重点的に検査するべきロープの位置の把握に有効であると考える。

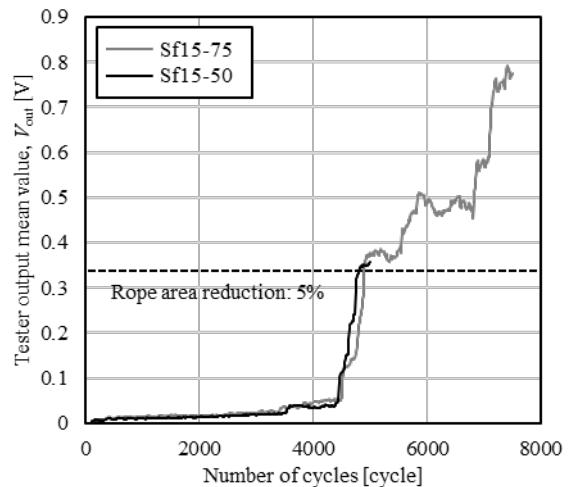


図 16 繰り返し数とテスター平均出力 V_{out} の関係
(差分計算, $L = 18d$)

4) 漏洩磁束法のロープ損傷評価の適用可能性と課題

最後に, これまで得られた結果から, ワイヤロープテスターを用いたワイヤロープの素線断線評価の適用可能性と課題について述べる。ワイヤロープテスターの適用については, 前提条件として以下の点に留意する必要がある。

A) 使用ロープ、シープ形状等の使用条件

本研究では、IWRC 6×Fi(29)B 種 o/o の公称ロープ径 $d = 16$ を対象とし、シープ径 $D = 256$ の S 曲げ疲労試験の結果を分析した。ロープ径やシープ径、ロープ種別が異なる場合や、シープを 1 度だけ通過する U 曲げ疲労試験の場合などは、素線断線位置が変化することで、テスタ出力との関係が変化する。そのため、本研究と同様の評価を実施し、テスタ出力と素線断線の相関関係を取得する必要がある。

B) 各張力における素線断線の分布

テスタ出力は素線断線の分布に大きく依存する。例えば、同じ断線本数でもロープ内部の断線よりもロープ表面の断線の方が、テスタ出力は大きくなる。したがって、素線断線を定量評価するためには、ロープ断面内の素線断線の分布が張力に依らず同様であることを事前に確認する必要がある。本研究で実施した張力 8.65 kN～34.6 kN の範囲の S 曲げ疲労試験では、ワイヤロープ内部の断線が支配的であること、ロープ断面内における素線断線位置の分布が同様であることを先行研究により確認している^{7), 8)}。

表 2 にワイヤロープの使用条件ごとにワイヤロープテスタの適用可能性を検討した結果を示す。張力の負荷条件、負荷履歴の有無、ワイヤロープテスタによる定期検査の有無によってワイヤロープの使用条件を分類し、それについてロープテスタの適用可能性を検討した。

表 2 使用条件ごとのワイヤロープテスタの適用可能性

テスタ検査	張力	負荷履歴	適用可能性
定期	一定	あり	<ul style="list-style-type: none"> 初期断線の定量予測 交換時期の予測
		不明	<ul style="list-style-type: none"> 初期断線の定量予測 (断面積減少率 < 5%)
	変動	あり	<ul style="list-style-type: none"> 初期断線の発生予測 交換時期の予測支援
		不明	<ul style="list-style-type: none"> 初期断線の発生予測
不定期	一定	あり	<ul style="list-style-type: none"> 初期断線の予測支援 交換時期の予測支援
		不明	<ul style="list-style-type: none"> 断線有無の検出
	変動	あり	<ul style="list-style-type: none"> 初期断線の予測支援 交換時期の予測支援
		不明	<ul style="list-style-type: none"> 断線有無の検出

十分な頻度で定期的にロープテスタの検査を実施し、図 16 に示すような時系列のデータを取得できる場合、初期断線の発生時期の予測が可能となる。さらに、使用開始初期のテスタデータとの差分出力で評価できるため SN 比が向上する。本研究で検討した一定張力の場合は、素線断線 (ロープの断面積減少率約 5%未満) の定量予測が可能であり、図 10 の結果より残存強度の推定も可能である。変動張力についても同様の方法で初期断線の発生予測、断線数の定量予測が可能であると考えるが、実際に試験データを取得し検証する必要がある。

ワイヤロープテスタの検査が不定期である場合、使用開始初期の差分出力の評価は困難であるが、図 14 に示すように素線断線有無の検出は可能である。また、ロープ張力の負荷履歴などからロープの余寿命を推定する手法と組み合わせることで、推定精度の向上が期待できる。ワイヤロープテスタの検査が不定期であり、ロープ張力の負荷履歴も不明である場合は、素線断線数の定量化は現状困難である。ただし、素線断線の有無の検出や断線位置の特定は可能であるため、ロープの検査箇所の絞り込みなど交換判断の支援が期待できる。

4. まとめ

ワイヤロープの S 曲げ疲労試験によって素線断線させたワイヤロープと、ワイヤロープテスタの出力の相関を分析し、漏洩磁束法を用いたワイヤロープの素線断線の非破壊検査手法を検討した。疲労試験後のワイヤロープを約 1 ピッチごとに小片化し、分解調査によって素線断線本数を計測した。得られた素線断線本数からロープの断面積減少率を算出し、素線断線の指標とした。また、疲労試験前後のワイヤロープの引張試験を実施し、ロープの残存強度を計測した。ワイヤロープテスタの出力について、分解調査のために小片化した領域ごとのテスタ出力の平均値 V_{out} を算出した。ロープの断面積減少率と V_{out} の関係を評価した結果、以下の結論を得た。

- ・ 総素線数で規定される廃棄基準近くまで素線断線したロープの断面積減少率と残存強度率には、線形性がある。つまり、ロープの断面積減少率から、残存強度を推定できることを示した。
- ・ 未断線と判断できる疲労試験初期のテスタ出力を用いた差分出力によって、ストランドや素線の構造に起因するノイズを低減し SN 比を向上できる。
- ・ テスタ出力の平均範囲を 3 ピッチ程度にすることで、 V_{out} とロープの断面積減少率の関係のばらつきを低減できる。
- ・ 疲労試験の繰り返し数に対して V_{out} は単調増加傾向を示すため、素線断線の有無の判定は十分可能である。
- ・ ロープの断面積減少率が約 5%未満であり、素線断線数が少ないワイヤロープであれば、ロープ張力によらず V_{out} と断面積減少率に線形性があり、素線断線の定量評価が可能である。

- ・素線断線数が廃棄基準に近いワイヤロープについては、 V_{out} と断面積減少率の線形性が失われるため、現状では定量評価は難しいが、素線断線の有無の判定、重点検査箇所の絞り込みは可能である。

参考文献

- 1) JIS B 8836:2019 クレーン - ワイヤロープ - 取扱い、保守、点検及び廃棄、日本産業規格。
- 2) ISO 4309:2008 Cranes - Wire ropes - Code of practice for care and maintenance, inspection and discard.
- 3) 本田尚, 山際謙太, 山口篤志, 佐々木哲也. 従来材及び新素材クレーン用ロープの経年損傷評価と廃棄基準の見直し. 労働安全衛生総合研究所 特別研究報告 JNIOSH-SRR-No.44-1. 2014.
- 4) 大塚 賢哉, 村山 直樹, 青木 義男. 漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査におけるストランドノイズの評価. 日本機械学会論文集. 2021; 87: 902: DOI: 10.1299/transjsme.21-00204.
- 5) Ju-Won Kim and Seunghee Park. Magnetic Flux Leakage Sensing and Artificial Neural Network Pattern Recognition-Based Automated Damage Detection and Quantification for Wire Rope Non-Destructive Evaluation. Sensors. 2018; 18: 109: DOI: 10.3390/s18010109.
- 6) クレーン構造規格. 厚生労働省. 2003.
- 7) 緒方公俊, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也. ロープ断面内の位置を考慮した IWRC 6×Fi(29)の素線断線評価. 2022; 15: 2: DOI: 10.2486/josh.JNIOSH-2022-0011-GE.
- 8) Masatoshi Ogata, Atsushi Yamaguchi, Kenta Yamagiwa, Naoya Kurashiki. New approach to identify wire breakage location in cross-section of steel wire ropes. Conference Proceedings of 8th International Stuttgart Ropedays 2025. 2025; p.1-9.