

吊り上げ用具類の寿命予測手法の開発[†]

Development of methods for life estimation of lifting equipment.

山際 謙太^{*1}, 山口 篤志^{*1}, 緒方 公俊^{*1}, 本田 尚^{*1}, 佐々木 哲也^{*1}

機械システム安全研究グループ^{*1}

■YAMAGIWA Kenta, YAMAGUCHI Atsushi, OGATA Masatoshi, HONDA Takashi, SASAKI Tetsuya

本研究は、クレーン等の荷役機械で使用されるワイヤロープの破断事故を未然に防止するため、現行の廃棄基準に代わる、より定量的かつ高信頼な寿命予測手法の構築を目的としている。従来、ワイヤロープの交換時期は表面の素線断線数やロープ径の減少に基づいて判断されてきたが、近年の研究からワイヤロープ内部で先行する不可視断線の存在や、検査者の技能に依存した判定のばらつきが問題視されている。そこで本研究では、新たに開発した往復駆動型ワイヤロープ疲労試験機を用い、クレーンの稼働実態を模擬した変動荷重下で S 曲げ疲労試験を実施し、荷重履歴と破断寿命の関係について詳細に分析した。その結果、ワイヤロープへの累積損傷度と寿命との関係は線形累積損傷則で整理することができ、損傷度 0.7 程度を交換の目安とすることで十分な安全性が確保できる可能性を示した。

さらに、ワイヤロープ内部の損傷を非破壊で評価する手法として、漏洩磁束法を用いた検出器による実験も行った。疲労試験中に取得した検出器の信号出力と素線断線数、および断面積減少率の間には、断面積減少率が小さい領域では高い線形性が確認され、残存強度の推定が可能であることが分かった。一方、断線が進行し破断直前に至ると線形性が失われるものの、検出器信号から破断の危険性を察知することは十分可能であった。これらの成果から、ワイヤロープの荷重履歴データと漏洩磁束法による非破壊検査データを組み合わせることで、従来よりも客観的かつ信頼性の高い寿命・残存強度評価および交換時期の推定が可能となることを示した。

1 研究の背景

ワイヤロープはクレーンを始めとして種々の荷役機械に使用されているが、これが破断することによる労働災害が後を絶たない。ワイヤロープの破断を防止するためには、定期的な検査により表面から見える素線の破断数またはロープ直径の減少を計測し、廃棄基準(JIS B8836¹⁾, ISO 4309²⁾)に達している場合には交換することが行われている。この交換基準はワイヤロープの状態を基準としている。

しかし、当研究所のこれまでの研究³⁾によって特に鋼心の IWRC (Independent Wire Rope Core) ワイヤロープでは、表面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となっている。このことは表面の素線断線(図 1)の破断数を計測する検査ではワイヤロープの損傷を正確に把握することが困難であることを示している。また、断線数による廃棄基準は断線箇所の見落としも考えられることから、検査者の能力に依存することも否めない。



図 1 素線断線しているワイヤロープの表面

一方、ワイヤロープに作用する公称応力と破断までのシーブ通過回数が片対数グラフで直線になることから、破断防止のためにはワイヤロープに負荷される荷重が一定の場合には、シーブ通過回数で寿命を予測すればよいことも明らかになっている³⁾。このことは、現在のワイヤロープの状態を基準とした廃棄基準に対して、負荷とシーブの通過回数などを活用した、すなわち時間管理による、より定量的な交換基準が提案できる可能性を示唆している。しかし、実機のワイヤロープに作用する荷重は一定ではないことの方が多いため、時間管理による交換基準を実用化するためには使用中に荷重が変動する場合の寿命予測法を構築する必要がある。変動荷重が作用する際の寿命予測法を構築することで、検査者の能力に依存しない定量的な余寿命評価法を確立できる。これは、第 13 次労働災害防止計画の重点事項である「科学的根拠、国際動向を踏まえた施策推進等」及び第 14 次労働災害防

^{*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

TEL：042-491-4512

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 山際謙太

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

止計画の重点事項「業種別の労働災害防止対策の推進」に資するものである。

2 研究の概要

1) 変動荷重下におけるワイヤロープの疲労累積損傷評価

ワイヤロープの破断寿命や交換時期を推定するためには、実際に稼働しているクレーン等を想定した強度試験の実施が必要である。そこで本テーマでは、クレーン用ワイヤロープとして主に IWRC 6×Fi(29)を対象に一定サイクルごとにロープ荷重を変動させた S 曲げ疲労試験等を実施し、線形累積損傷則の成立の成否を確認するとともに、ワイヤロープの破断寿命や負荷履歴データの収集および分析から、ワイヤロープの破断寿命や残存強度を推定する手法を検討している。

本テーマの特色は、新たに開発した往復駆動型ワイヤロープ疲労試験機を使用して、ワイヤロープの疲労特性を得ているところにある。当該試験機は、これまでの研究³⁾で使用された試験機とは異なり、試験波形を正弦波、三角波、台形波等に設定可能であり、かつワイヤロープが 1 往復する毎に、荷重を変更可能な機能を搭載している(図 2)。

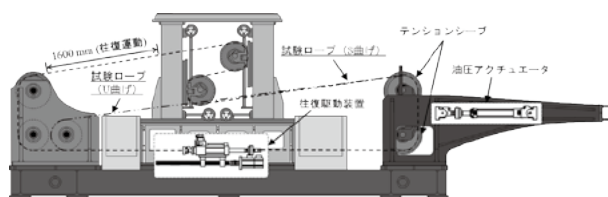


図 2 往復駆動型ワイヤロープ試験機概略図

S 曲げ疲労試験等を実施するうえで、試験荷重はクレーン構造規格から検討している。クレーン構造規格によるとクレーン等で使用される巻上げ用ワイヤロープの安全率は 3.55 から 5 の範囲にあり、つり上げ装置等の等級で決定される。本テーマでは、つり上げ装置等の使用時間が長時間であり、つり上げ装置の等級が D 以上になるものを対象として、安全率 5 を採用している。ここで、つり上げ装置の等級とはクレーン構造規格別表第 3⁴⁾により決定されるもので、等級 A から等級 F までである。この等級は、つり上げ装置の使用時間と常態として定格荷重の何%の荷重の荷をつるかで決定され、等級 A よりも等級 F のほうが使用時間が長く、常態として負荷される荷重が大きいものとなる。つり上げ装置の等級が D 以上は安全率 5 を採用することとなっている。

したがって、試験荷重の最大値は、規格破断力の 1/5 として試験を実施している。これまでの研究で使用された試験機と同じ試験条件で S 曲げ疲労試験を実施したところ、それぞれから得られたワイヤロープの疲労特性はほぼ同等であった。したがって、新たに開発した往復駆動型ワイヤロープ疲労試験機は、これまでの研究で使用された試験機と同等の性能を有するものであることを確認し

ている。

当該試験機を使用して、一定サイクルごとにロープ荷重を変動させた S 曲げ疲労試験等を実施したところ、得られた疲労特性は、線形累積損傷則から得られた累積損傷度 $D=1$ に対して $\pm 15\%$ で収束しており、累積損傷則が概ね成立するように見られた。一方で、無負荷の状態を取り入れた S 曲げ疲労試験から得られた累積損傷度は $D=0.8$ で収束するように見られた。また、破断力試験によると、累積損傷度 $D=0.6$ 程度で JIS により規定される最小最小値の破断力まで低下する傾向が見られた。これらの試験結果から、クレーン等の稼働履歴から累積損傷度を算出でき、かつ S 曲げを受けるワイヤロープである場合、 $D=0.6$ 程度に到達したらワイヤロープの交換または廃棄の検討を進め、 $D=0.7$ に到達するまでに交換または廃棄を実施することで、安全にワイヤロープを使用できると考えられる。このように累積損傷度と残存強度の関係からワイヤロープの交換時期の推定が可能であることを示している。

なお、本研究の結果は IWRC 6×Fi(29)を用いているがワイヤロープには様々な構造、直径のものがある。それぞれの適切な交換時期を推定するためには、現段階では本研究と同様の疲労試験等により強度特性等を得た上で交換時期等の推定を行う必要がある。

2) ワイヤロープ損傷検出による寿命および残存強度予測

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。

図 2 に示すワイヤロープ疲労試験機に漏洩磁束法による検出器を取り付けて S 曲げ疲労試験を実施した。これにより、疲労試験を行なっている間、任意のタイミングで検出器の信号出力を得ることが可能となった。

疲労試験中に素線断線が増加するにつれて、検出器によって計測される信号出力も徐々に増加していくと考えられる。そこで素線断線と検出器の信号出力の相関関係を分析した。

疲労試験は張力を 34.6, 25.95, 17.3, 8.65 kN として実施し、ワイヤロープの破断前に疲労試験を停止した。ワイヤロープ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公称径 d が 16 mm の IWRC 6×Fi(29) B 種 o/o を用いた。複数本の疲労試験を行い、以下の①～④を計測した。

- ① 検出器による信号出力
- ② 目視による可視断線数
- ③ 分解調査による内部の素線断線数
- ④ 引張試験による疲労試験後のワイヤロープの残存強度及び新品時の破断強度

それぞれの計測結果を分析し、以下の結論を得た。

疲労試験の繰返し数に対して検出器の出力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

あった。

素線断線をロープ断面積の減少と考え、素線断線本数からワイヤロープの断面積減少率を算出した。その結果、断面積減少率と残存強度率(=残存強度/新品時の破断強度)には、線形性があることを確認した。つまり、断面積減少率から、残存強度を推定できることを示した。

断面積減少率が 5%未満であれば検出器の出力と断面積減少率に線形性があり、素線断線数の定量評価が可能であることを示した。一方で、断面積減少率が増加し、廃棄基準近くまで素線断線が進行すると線形性が失われ断線数の定量評価が困難になることがわかった。

これらの結論を取りまとめることで、ワイヤロープの使用条件に対応した検出器の適用可能性を示した。

3 今後の課題

1) 変動荷重下におけるワイヤロープの疲労累積損傷評価

S 曲げ疲労試験等で負荷した荷重は 4 水準であるが、実際のクレーン等で使用されるワイヤロープには、様々な重さのつり荷による荷重が負荷される。実際のクレーン等で記録されている荷重履歴を取得し、本テーマで実施している試験条件から得られた疲労特性と一致するかどうかの検証が期待される。

また、変動荷重下における S 曲げ疲労試験を途中で停止することで作成した損傷ロープの残存強度が、JIS で規定される規格破断力に対してどれほど低下しているか取得できていない。変動荷重下における S 曲げ疲労試験から得られた疲労特性と“損傷度と残存強度の関係”を組み合わせることで、実際のクレーン等の稼働状況に則したワイヤロープの交換時期の提案ができる可能性がある。

2) ワイヤロープ損傷検出による寿命および残存強度予測

素線断線数が増加し、破断が近くなってくると検出器の出力と断面積減少率との間の線形性が失われている。一方で破断の可能性を検出できることが最終的には安全に資することになる。こうした線形性が失われているような関係については機械学習等を活用することで推定することが可能となる。本研究では検出器の信号のデータと素線断線数の関係は十分な量のデータがすでに得られていることから、信号データを教師データとし、1 次元の畳み込みニューラルネットワーク等を活用し素線断線数または残存強度を推定する手法の研究などが今後の課題として挙げられる。

専門用語

線形累積損傷則

ある応力 σ_i での部材の疲労寿命が N_i で与えられるとき、繰返し数 n_i の時点における疲労損傷が n_i/N_i で表され、 $\sum n_i/N_i=1$ で破壊すると言う考え方。

累積損傷度(D)

線形累積損傷則における $\sum n_i/N_i$ 。

漏洩磁束法

鉄鋼材料中のきず(割れ、腐食、断線等)を検出する非破壊検査法の一つ。ワイヤロープの場合は断線すると、磁化したときに断線した箇所では磁束が乱れ(漏洩)するので、それを検出することで断線を検出することができる。

シーブ

ワイヤロープ等を通すための滑車。

S 曲げ疲労試験

ワイヤロープが 2 つのシーブを使い”S”の字になるように曲げられている状態で往復運動することにより行う疲労試験。1 つのシーブを使って行う疲労試験を U 曲げと呼ぶ。

規格破断力

JIS G 3525 等の記載のあるワイヤロープの構成、直径等から定められている破断に必要な最小の力(単位:kN)。

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 他, 労働安全衛生総合研究所 特別研究報告 SRR-No.44-1 従来材及び新素材クレーン用ワイヤロープの経年損傷評価と廃棄基準の見直し
- 4) 厚生労働省, クレーン構造規格, 2019.

研究業績リスト

課題名：吊り上げ用具類の寿命予測手法の開発

令和3年度（2021年）		
1	原著論文	泉聡志, 中谷起也, 太田仁衣奈, 波田野明日可, 山際謙太, (2021) エレベータ用ワイヤロープの径方向剛性を再現する有限要素モデリング. 日本機械学会論文集, Vol.87, No.896, DOI: 10.1299/transjsme.20-00418.
2	総説他	山際謙太, 緒方公俊, 泉聡志(2021), ワイヤロープの疲労試験と有限要素解析. 日本機械学会誌 2021 年 12 月号.
3	国内学術集会	緒方公俊, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也(2021) 疲労損傷ワイヤロープの素線断線位置推定法の開発. 日本材料学会第 70 回学術講演会.
4	国内学術集会	緒方公俊, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也(2021) 素線断線推定法によるワイヤロープの疲労損傷状態の評価. 安全工学シンポジウム 2021, GS-9-3.
5	国内学術集会	太田仁衣奈, 緒方公俊, 山際謙太, 波田野明日可, 泉聡志(2021) クレーン用ワイヤロープの有限要素モデリング. 資源・素材 2021.
6	国内学術集会	本田尚, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也(2021)クレーン用ワイヤロープの疲労寿命に及ぼすロープ直径の影響.安全工学シンポジウム 2021, GS-9-2
7	国内学術集会	山口篤志, 緒方公俊, 本田尚(2021) 廃棄基準に達した玉掛け用ワイヤロープの各種損傷評価. 安全工学シンポジウム 2021, GS-9-1
8	国内学術集会	山口篤志, 緒方公俊, 本田尚(2021) 長期間使用された玉掛け用ワイヤロープにおける損傷状態の調査. 第 54 回安全工学研究発表会
令和4年度（2022年）		
1	原著論文	緒方公俊, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也, 泉聡志(2022) 素線形状の定式化によるワイヤロープ断面内の断線位置推定手法の提案. 日本機械学会論文集, Vol.88, No.908, DOI: 10.1299/transjsme.22-00038.
2	原著論文	緒方公俊, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也(2022) 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. 労働安全衛生研究, Vol.15, No.2, pp.113-122.
3	原著論文	太田仁衣奈, 緒方公俊, 山際謙太, 泉聡志(2022) IWRC ワイヤロープの有限要素モデリングによる軸方向と径方向剛性の再現. 日本機械学会論文集, Vol.88, No.913, DOI: 10.1299/transjsme.22-00144.
4	著書・単行本	山際謙太, 他 23 名(2022), ”ばねのフラクトグラフィ・事例集付き”, 日本ばね学会
5	総説他	本田尚(2022) クレーン用ワイヤロープの経年損傷と非破壊検査-ワイヤロープの経年損傷とメカニズム-. Jistsu・Ten No.327 pp.3-6
6	総説他	本田尚(2022) クレーン用ワイヤロープの経年損傷と非破壊検査-鋼心ワイヤロープの可視断線と非破壊検査-. Jistsu・Ten No.328 pp.2-7
7	総説他	山口篤志(2022) クレーン用ワイヤロープの経年損傷と非破壊検査-非破壊検査による素線断線の検出-. Jistsu・Ten No.329 pp.3-7
8	国際学術集会	Masatoshi Ogata, Atsushi Yamaguchi, Kenta Yamagiwa and Tetsuya Sasaki(2022), Fatigue Life Evaluation of Wire Rope under Constant and Two-Step Tension by S-Bending Fatigue Test. Workshop on Industrial Safety and Health 2022.
9	国内学術集会	緒方公俊, 泉聡志, 山際謙太(2022) 曲げ変形を再現する鋼心ワイヤロープの有限要素モデリング. 日本機械学会第 35 回計算力学講演会.
10	国内学術集会	緒方公俊, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也, 泉聡志(2022) IWRC 6×Fi(29)の素線断線状態が 2 段階張力 S 曲げ疲労試験の疲労寿命に及ぼす影響. 資源・素材学会資源・素材 2022 (福岡), 予稿集, 3406-12-02.
11	国内学術集会	緒方公俊, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也, 倉橋哲也, 泉聡志(2022) IWRC 6×Fi(29)の素線断線を考慮した 2 段階張力 S 曲げ疲労寿命予測手法の開発. 日本材料学会第 35 回疲労シンポジウム, 講演論文集, 講演番号 50.
12	国内学術集会	本田尚, 山口篤志, 佐々木哲也(2022) クレーン用ワイヤロープの疲労寿命に及ぼす曲げ応力の効果.安全工学シンポジウム 2022, GS-4-5

13	国内学術集会	山口篤志, 緒方公俊, 本田尚(2022) 複数の損傷を有するワイヤロープ 6×24 の残存強度評価. 安全工学シンポジウム 2022, GS-4-6
14	国内学術集会	山口篤志, 本田尚, 緒方公俊(2022)長期間使用された玉掛けワイヤロープの残存強度評価. 第 55 回安全工学研究発表会
15	国内規格	山際謙太 他, JCA TS0501-2022 ワイヤロープのコッタ止めによる緊結方法
16	国際規格	山際謙太 他, ISO 23703:2022Microbeam analysis — Guidelines for misorientation analysis to assess mechanical damage of austenitic stainless steel by electron backscatter diffraction (EBSD)
令和 5 年度 (2023 年)		
1	特別講演, パネルディスカッション等	山際謙太, クレーン用ワイヤロープの疲労寿命の研究と ISO および JIS への応用, 日本機械学会 M&M2023 材料力学カンファレンス
2	国際学術集会	Masatoshi OGATA, Atsushi YAMAGUCHI, Naoya KURAHASHI, Kenta YAMAGIWA and Satoshi IZUMI (2023) Consideration of wire fatigue mechanism of wire rope. The Advanced Technology in Experimental Mechanics and International DIC Society Joint Conference 2023, OS4-04-I22, no page description.
3	国内学術集会	山口篤志, 緒方公俊, 山際謙太, 佐々木哲也(2023)S 曲げ疲労を受けたワイヤロープの残存強度と損傷度の関係-IWRC 6×Fi(29)の場合-. 日本機械学会年次大会, S171-05
4	その他	緒方公俊, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也, 泉聡志: 日本機械学会奨励賞 (研究). 素線形状の定式化によるワイヤロープ断面内の断線位置推定手法の提案, 2023 年 4 月.
令和 6 年度 (2024 年)		
1	原著論文	Masatoshi OGATA, Atsushi YAMAGUCHI, Kenta YAMAGIWA, Naoya KURAHASHI and Satoshi IZUMI(2024) Finite element modeling for single-twisted Fi(29) strand that reproduces strand stiffness and wire stress. Mechanical Engineering Journal, Vol.11, No.6 DOI: 10.1299/mej.24-00299.
2	研究所出版物	山口篤志, 本田尚, 緒方公俊(2024) 長期間使用された玉掛け用ワイヤロープの損傷状態の調査. 労働安全衛生研究, Vol.17, No.1, pp.63-69.
3	国内学術集会	緒方公俊, 山口篤志, 山際謙太, 倉橋直也(2024) シープ上での繰返し曲げを受ける IWRC 6×Fi(29)ワイヤロープの変動張力を考慮した損傷予測手法の提案. 日本機械学会 2024 年度年次大会.
4	国内学術集会	山口篤志, 緒方公俊, 本田尚, 山際謙太(2024) 磁気探傷試験による損傷したクレーン用ワイヤロープの非破壊試験 - IWRC 6×WS(31)の場合 -. 日本機械学会 2024 年度年次大会.
5	国内学術集会	緒方公俊, 山口篤志, 山際謙太, 倉橋直也(2024) シープ上で繰返し引張曲げを受けるワイヤロープ素線の破面解析. 第 18 回フラクトグラフィシンポジウム.
6	国内学術集会	山際謙太(2024) Vision Transformer を用いたフラクタル画像の分類. 第 18 回フラクトグラフィシンポジウム.
7	国内学術集会	山際謙太(2024) 「金属の破断面解析と機械学習の融合研究の紹介」, 第 75 回白石記念講座「データ駆動型材料開発の最前線とその適用例」.
8	国内学術集会	山口篤志, 本田尚, 山際謙太, 佐々木哲也 (2024) S 曲げ疲労試験により損傷したクレーン用ワイヤロープの非破壊検査について - IWRC 6×Fi(29)の場合 -, 安全工学シンポジウム 2024, GS-6-1.
9	国内学術集会	本田尚, 山口篤志, 佐々木哲也(2024)鋼心ワイヤロープの断線数と破断力の関係, 安全工学シンポジウム 2024, GS-6-2.
10	国内規格	山際謙太 他, 金属材料の回転曲げ疲れ試験方法, JIS Z 2274, 2024
11	その他	山口篤志, 緒方公俊, 山際謙太, 佐々木哲也: 一般社団法人日本機械学会 産業・化学機械と安全部門 論文表彰. S 曲げ疲労を受けたワイヤロープの残存強度と損傷度の関係-IWRC 6×Fi(29)の場合-, 2024 年 5 月.