

変動荷重下におけるワイヤロープの疲労累積損傷評価†

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

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。そこで本報告では、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している。また、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。S 曲げ疲労試験により得られたワイヤロープの疲労特性は、損傷度 $D=1$ に対して $\pm 15\%$ で収束しており、線形累積損傷則が概ね成立するように見られる。一方で、無負荷の状態を考慮した S 曲げ疲労試験から得られる疲労特性は $D=0.8$ にあり、疲労寿命は低下する傾向が得られた。さらに、破断力試験によると、 $D=0.6$ 程度で規格破断力に低下する傾向が見られる。これらの試験結果から、使用履歴から損傷度 D 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、 $D=0.6$ 程度に到達したときにワイヤロープの交換または廃棄の検討を進めるとよい。さらに、 $D=0.7$ 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。また、疲労試験により得られる損傷度、および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は可能である。

キーワード: ワイヤロープ、廃棄基準、疲労強度、変動荷重、残存強度。

1. はじめに

建設業や製造業で多用されているクレーン等のワイヤロープは消耗品であり、定期的な交換または廃棄が必要である。適切な交換時期を経過したまま使用すると、クレーン等の稼働中にワイヤロープが切れ、つり荷の落下やブームの倒壊が発生する。クレーン等の周辺で作業する作業者の安全が確保されるには、クレーン等に使用されるワイヤロープの適切な交換または廃棄の実施が重要である。ここで、クレーン構造規格¹⁾によれば、一よりの間にワイヤロープを構成する素線の 10%が断線する前に交換、廃棄する必要がある。一方で、ワイヤロープ内部の素線の破断状況が確認できないため、10%の断線を確認することができない²⁾。JIS B 8836³⁾においても、例えば IWRC 6×Fi(29)の場合、素線断線数に注目すれば、以下の条件に到達すると交換することとしている。

- ・ 直径の6倍の長さの間に山断線が6本以上
- ・ 直径の30倍の長さの間に山断線が11本以上
- ・ 直径の6倍の長さの間に谷断線が2本以上

クレーン構造規格および JIS B 8836 では、素線断線数を基準とした廃棄基準を示しているが、内部の素線断線数を確認することは困難である。また、クレーン等のワイヤロープは数十 m 以上あり、これを目視で確認することは現実的ではないと考えられる。点検時には人足も必要になることから、昨今の人手不足を鑑みたとき、ワイヤロープの負荷履歴を考慮して交換することが有効と言える。

過去の報告²⁾では、動索として使用されるワイヤロープの破断による災害の低減を目的に、一定の荷重を受けるワイヤロープの疲労試験を実施している。荷重、シープ通過回数（曲げ回数）や断線数の関係を整理し、ワイヤロープの破断寿命の予測が可能であることが示されている。一方で、実際に稼働しているクレーン等においては、常に同じ重さの荷をつることは多くない。つり上げ荷重に近い重さの荷は稀につるが、多くはクレーン等の能力に対して十分小さい重さの荷をつる作業であるといった場合も考えられ、ワイヤロープは変動荷重下にあるといえる。したがって、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、ワイヤロープに負荷される荷重が変動する状況下で疲労試験を行い、線形累積損傷則⁴⁾が成立することを確認する必要がある。そこで、クレーン用ワイヤロープを対象に、一定サイクルごとにロープ荷重を変動させた疲労試験を実施し、線形累積損傷則⁴⁾の成立の成否を確認とともに、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。ここでは得られた成果を報告する。

2. ワイヤロープ疲労試験機の性能と供試ワイヤロープの疲労特性

1) 使用するワイヤロープ疲労試験機

ワイヤロープ疲労試験機は 2 種 3 台有しており、内訳は回転駆動型ワイヤロープ疲労試験機 1 台、往復駆動型ワイヤロープ試験機 2 台である。過去の報告²⁾においては、回転駆動型ワイヤロープ疲労試験機を使用して疲労試験結果を得ている。図 1 に回転駆動型ワイヤロープ疲労試験機の概略図を、図 2 に往復駆動型ワイヤロープ試験機の概略図をそれぞれ示す。回転駆動型ワイヤ

† 本報の一部は、参考文献 10)の一部を加筆修正し、まとめ直したものである。

*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 山口篤志
E-mail: yamaguchi@s.jniosh.johas.go.jp

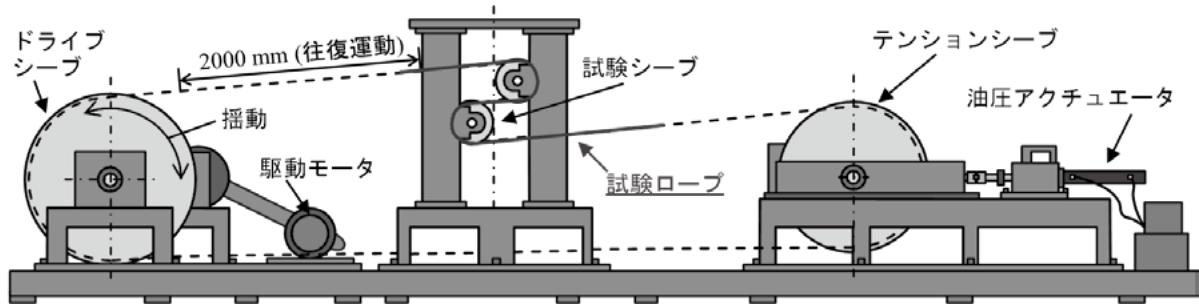
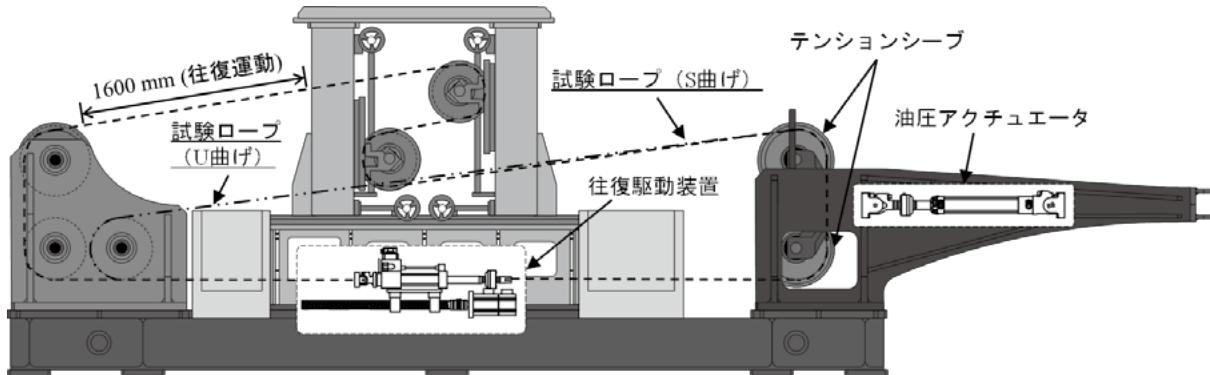
図1 回転駆動型ワイヤロープ試験機の概略図²⁾

図2 往復駆動型ワイヤロープ試験機の概略図

ロープ疲労試験機は、油圧アクチュエータに接続されたテンションシーブにより試験ロープに荷重を負荷するものである。ドライブシーブが揺動することで、試験ロープが往復運動する。試験機の中央にはテストシーブが搭載され、ワイヤロープがS曲げを受けるよう構成されている。なお、ワイヤロープの往復運動は正弦波である。

次に、往復駆動型ワイヤロープ疲労試験機は新たに開発したワイヤロープ疲労試験機である。試験ロープは油圧アクチュエータに接続されたテンションシーブを介して負荷を受ける。また、往復駆動装置が稼働することで、試験ロープが往復運動する。回転駆動型ワイヤロープ疲労試験機同様、試験機の中央で試験ロープはS曲げを受ける。試験ロープの往復運動は正弦波、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、荷重が変更できる機能を有している。また、試験ロープの掛け方を変更することで、U曲げ疲労試験を行うことが可能である。

前述したように、往復駆動型ワイヤロープ疲労試験機は新たに開発した試験機であることから、回転駆動型ワイヤロープ疲労試験機と同様の成果が得られるか検証する必要がある。そこで、両ワイヤロープ疲労試験機を使用して、S曲げ疲労試験を実施している。

2) 供試ワイヤロープ

S曲げ疲労試験で使用する試験ロープは、図3に示すIWRC 6×Fi(29)としている。これは、クレーンメーカーへの聞き取り調査やクレーンメーカーのカタログなどを

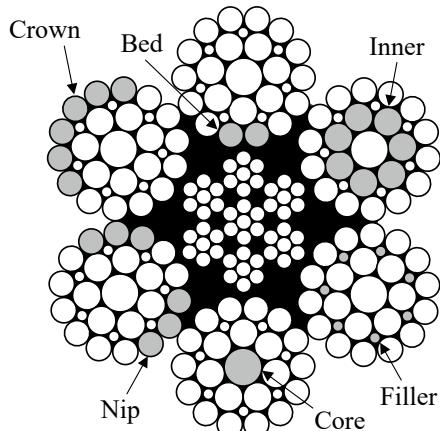


図3 IWRC 6×Fi(29)の断面図と各素線の名称

調査したところ、IWRC 6×Fi(29)が一般的に使用されていることが見受けられたことから採用している。試験機の仕様から、ワイヤロープの直径 d_R は 16 mm としている。また、JIS で規定される破断力（最小値）は 173 kN である⁵⁾。ここで、試験ロープに有意な差が現れるか確認するために、製造ロットが異なる 3 種類の試験ロープ入手し、破断力試験⁵⁾に供している。表1に破断力試験結果を示す。製造ロットによらず破断力のばらつきは小さく、JIS G 3525 で規定される破断力（最小値）173 kN を十分に上回っているが、その破断力は製造ロットによって異なっている。

表 1 製造ロットごとの破断力試験結果

試験No.	製造ロット		
	A	B	C
1	212.1	202.8	190.3
2	212.1	202.9	188.2
3	212.6	198.7	190.3
平均	212.3	201.5	189.6

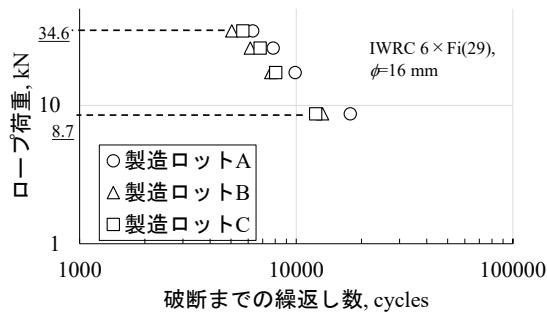


図 4 製造ロットによる S 曲げ疲労試験結果の差異

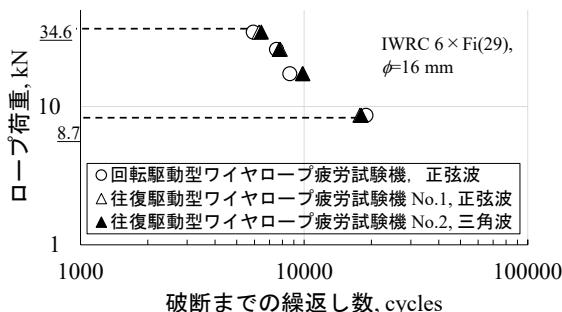


図 5 試験機による S 曲げ疲労試験結果の差異

次に、同試験ロープを S 曲げ疲労試験に供している。ここで、S 曲げ疲労試験の試験荷重は次のように検討している。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 の範囲にある¹⁾。この安全率はクレーン構造規格別表第 3 で示される、つり上げ装置等の等級から決定される。本報告では、つり上げ装置等の使用時間が長時間となる、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。したがって、試験ロープに負荷する荷重（以下、ロープ荷重）の最大値は、規格破断力 173 kN の 1/5 である 34.6 kN としている。試験ロープの疲労特性を得るためにには、いくつかの試験荷重を設定する必要がある。したがって、ロープ荷重は 34.6 kN を基準に、3/4 となる 26.0 kN, 2/4 となる 17.3 kN, 1/4 となる 8.7 kN の 4 水準としている。繰返し速度は 10 cycles/min である²⁾。なお、S 曲げ疲労試験は試験ロープが破断するまで実施し、1 往復を 1 cycle としている。

図 4 に S 曲げ疲労試験の結果を示す。縦軸はロープ荷重、横軸は破断までの繰返し数である。各製造ロットにおけるワイヤロープは破断力が同等となるものを使用している。製造ロットによって破断寿命が異なること、および疲労特性の傾きに差があることが確認できる。また、破断力が同等であれば、各点が有するばらつきに大きな差は見られないことを確認している。表 1 および図 4 の結果から、破断力と疲労強度の大小関係は一致している。ワイヤロープは多数の素線がより合わせて構成されており⁶⁾、素線の材質や線径、型付率（形付率）などが影響しているものと考えられる。特に型付率は 100% が基準とされているが、100% 以上になるとストランドが浮き気味となり、ちょうどちん状形崩れ（かご状形崩れ³⁾）と考えられる）を起こしやすくなる^{7), 8)}、一方で型付率が小さいとロープのほうが戻りやすくなる⁷⁾、いずれも破断力や破断寿命に影響するものと考えられる。破断力が小さいワイヤロープへ交換する際は、破断寿命が短くなる可能性がある。したがって、交換時にはワイヤロープの破断力、グリスの種類やめっき処理の有無などが記載された証明書等を確認することが重要と考えられる。なお、本報告では、破断力のばらつきが最も小さい製造ロット A の仕様を基準としたワイヤロープを採用している。

最後に、往復駆動型ワイヤロープ疲労試験機の性能確認を行っている。回転駆動型ワイヤロープ疲労試験機における試験ロープの往復挙動は正弦波となるため、2 台ある往復駆動型ワイヤロープ疲労試験機のうち 1 台は往復挙動を正弦波として、これを No.1 とする。次に、クレーン等による巻上げ、巻下げは一定の速度であることから、もう 1 台の往復駆動型ワイヤロープ疲労試験機の往復挙動は三角波として、これを No.2 とする。両ワイヤロープ疲労試験機を使用した S 曲げ疲労試験結果を図 5 に示す。3 台それぞれから得られた疲労特性はほぼ同等である。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、回転駆動型ワイヤロープ疲労試験機と同等の性能を有するものであり、かつ、実際のクレーン等の巻上げ、巻下げ操作によるワイヤロープの往復挙動を再現しているものといえる。これ以降、ワイヤロープの疲労試験では三角波を採用している。

3. ワイヤロープ疲労試験機を使用した S 曲げ疲労試験 および U 曲げ疲労試験

クレーン等で使用されるワイヤロープは、S 曲げおよび U 曲げを受ける。そこで、往復駆動型ワイヤロープ疲労試験機を使用して、S 曲げ疲労試験および U 曲げ疲労試験を実施している。なお、ワイヤロープは IWRC 6×Fi(29) の他に、比較対象のロープとして IWRC 6×WS(31) を採用し、疲労試験を実施している。IWRC 6×WS(31) は、過去の報告²⁾ や移動式クレーンに採用されている⁹⁾ こと、直径 $d_{\text{R}}=16 \text{ mm}$ のとき JIS で規定さ

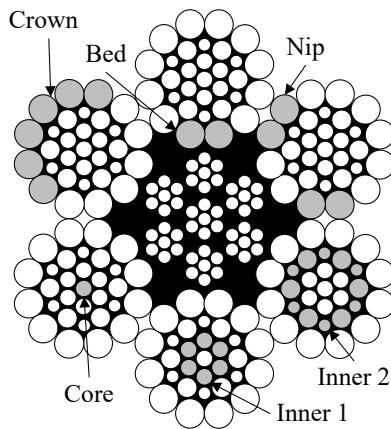


図 6 IWRC 6×WS(31)の断面図と各素線の名称

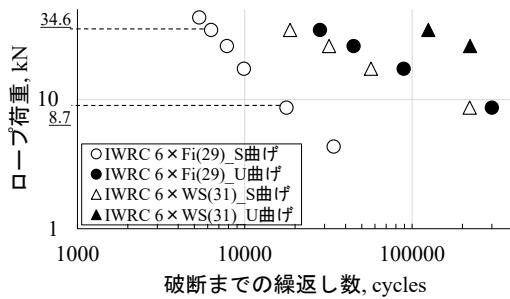


図 7 S 曲げおよび U 曲げ疲労試験の結果

れる破断力（最小値）が 173 kN であり⁵⁾、IWRC 6×Fi(29)と一致することから採用している。なお、WS タイプは Fi タイプに比べて、耐疲労性が向上しているワイヤロープである²⁾。図 6 は、IWRC 6×WS(31)の断面図および各素線の名称である。

S 曲げ疲労試験および U 曲げ疲労試験の結果を図 7 に示す。IWRC 6×Fi(29)の疲労試験においては、線形累積損傷則⁴⁾における $D=1$ を累乗近似曲線により決定するため、ロープ荷重 43.3 kN（安全率 5 に相当する 34.6 kN の 5/4）および 4.4 kN を負荷した疲労試験を実施している。S 曲げ、U 曲げによらず両対数で表すことで疲労特性は直線的に表すことができる。前述にしたように、1 往復を 1 cycle としていることから、S 曲げの場合は 1 cycle でシープを 4 回通過する一方、U 曲げは 2 回通過する。したがって、シープ通過回数で整理すると、U 曲げ疲労試験の破断寿命は 1/2 を乗じて整理する必要がある。なお、IWRC 6×Fi(29)の S 曲げ疲労試験結果および U 曲げ疲労試験結果で比較すれば、ロープ荷重 34.6 kN で 4.5 倍、ロープ荷重 8.7 kN で 17 倍程度 U 曲げによる破断寿命が長い。シープ通過回数で整理したとしても S 曲げ疲労よりも U 曲げ疲労の方が、破断寿命が長い。これは、ワイヤロープがシープを通過する際に、S 曲げの場合は 180° と -180° の曲げを受けることから、曲げ応力 σ_θ が発生する。一方、U 曲げの場合は 180° の曲げを受けることから、曲げ応力 σ_θ が発生

する。この曲げ応力の差や曲げにより発生する素線同士の摩擦の影響が破断寿命の差に現れているものと推定される。なお、IWRC 6×WS(31)の U 曲げ疲労試験は、ロープ荷重 34.6 kN と 27.6 kN のみ取得している。これは、繰返し数が 3×10^6 回に到達すると試験日数が 20 日を超えることから、ここを打ち切り回数としている。IWRC 6×WS(31)の S 曲げ疲労試験結果および U 曲げ疲労試験結果で比較すれば、ロープ荷重 34.6 kN で 6.7 倍程 U 曲げによる破断寿命が長い。

4. 変動荷重試験

前述したように、実際に稼働しているクレーン等においては、様々な重量の荷をつることからワイヤロープは変動荷重下にある。したがって、ワイヤロープの交換寿命や残存寿命を推定するうえでは、変動荷重下にある疲労試験の実施が重要である。そこで、往復駆動型ワイヤロープ試験機を使用して、変動荷重下にある S 曲げ疲労試験、U 曲げ疲労試験を実施するとともに、線形累積損傷則が成立するか調査している。線形累積損傷則は、図 7 に示すような定常荷重下の疲労試験結果から変動荷重下の疲労強度を推定する際に用いられる累積損傷則の基本的なものである。なお、線形累積損傷則は、荷重（または応力）の繰返し負荷により損傷が限界値に達すると破壊するという考え方であり、次の式で表すことができる⁴⁾。

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

ここで、 D ：損傷度、 i ：負荷する定常的な荷重の数、 n_i ：定常的な荷重（または応力）が繰返し負荷された回数、 N_i ：定常的な荷重（または応力）が繰返し負荷されて破断したときの回数である。

本報告では、線形累積損傷則が成立するか検討するための足がかりとして、IWRC 6×Fi(29)を対象に、以下の条件でロープ荷重を変動させ、ワイヤロープが破断するまで S 曲げ疲労試験を実施している。

- ① ロープ荷重は 34.6 kN, 26.0 kN, 17.3 kN, 8.7 kN
- ② 低荷重側から高荷重側へ切替を 1 回、または高荷重側から低荷重側へ切替を 1 回実施
- ③ 荷重切替時の繰返し数：1500, 3000, 4500, 9000 cycles

荷重切替時の繰返し数は、定常荷重試験におけるロープ荷重 8.7 kN の破断寿命が 18000 cycles 程度であることから、これの 1/2 となる 9000 cycles を最大値としている。次に、定常荷重試験におけるロープ荷重 34.6 kN の破断寿命が 6000 cycles 程度であることから、公約数を考慮し、9000 cycles を基準として、その 1/2, 1/3, 1/6 となる繰返し数を採用している。表 2 に試験結果を示す。グレー背景のセルは試験を実施していない、ま

表 2 変動荷重（1回切替）試験の試験結果

切替時の回数		切替前のロープ荷重, kN			
1500 cycles		34.6	26.0	17.3	8.7
切替後の ロープ荷重, kN	34.6		5234	5419	5702
	26.0	6647		6456	6692
	17.3	9949	9238		8082
	8.7	22482	19301	16226	
切替時の回数		切替前のロープ荷重, kN			
3000 cycles		34.6	26.0	17.3	8.7
切替後の ロープ荷重, kN	34.6		6334	6370	7092
	26.0	7827		7445	8205
	17.3	10649	9999		8817
	8.7	20212	19168	18228	
切替時の回数		切替前のロープ荷重, kN			
4500 cycles		34.6	26.0	17.3	8.7
切替後の ロープ荷重, kN	34.6		5911	6527	7062
	26.0	6508		7025	8077
	17.3	7865	7882		8919
	8.7	15965	15266	16181	
切替時の回数		切替前のロープ荷重, kN			
9000 cycles		34.6	26.0	17.3	8.7
切替後の ロープ荷重, kN	34.6				10607
	26.0				9639
	17.3				10275
	8.7				

たは定常荷重試験で実施済みに相当することを示している。例えば、切替時の回数が 9000 cycles の場合、定常荷重試験におけるロープ荷重 34.6 kN の破断荷重が 6000 cycles 程度であることから、切替試験が実施できない。また、切替時の回数が 9000 cycles かつ切替前のロープ荷重 17.3 kN については、定常荷重試験におけるロープ荷重 17.3 kN が 10000 cycles 程度であり、製造ロットのばらつきにより、10000 cycles 未満で破断することが確認されたことから実施しないものとしている。破断寿命に注目すると、切替前のロープ荷重および切り替え後のロープ荷重が小さいほど、破断寿命が伸びていることが分かる。

次に、表 2 で得られた試験結果から式(1)を使用して算出した損傷度 D を表 3 に示している。 D の算出にあたり、 N_i は図 7 に示した IWRC 6×Fi(29) S 曲げ疲労試験の疲労特性をから得られた近似曲線より計算している。34.6 kN では 6163 cycles、26.0 kN では 7745 cycles、17.3 kN では 10687 cycles、8.7 kN では 18529 cycles である。したがって、例えば表 2 内の切替時の回数が 1500 cyclesにおいて、切替前のロープ荷重 26.0 kN であり、切替後のロープ荷重 17.3 kN である場合、式(1)を用いると、

表 3 表 2 の試験結果から得られる損傷度 D

切替時の回数		切替前のロープ荷重, kN			
1500 cycles		34.6	26.0	17.3	8.7
切替後の ロープ荷重, kN	34.6		0.80	0.78	0.76
	26.0	0.91		0.78	0.75
	17.3	1.03	0.92		0.70
	8.7	1.38	1.15	0.94	
切替時の回数		切替前のロープ荷重, kN			
3000 cycles		34.6	26.0	17.3	8.7
切替後の ロープ荷重, kN	34.6		0.93	0.83	0.83
	26.0	1.06		0.85	0.83
	17.3	1.20	1.04		0.71
	8.7	1.42	1.26	1.10	
切替時の回数		切替前のロープ荷重, kN			
4500 cycles		34.6	26.0	17.3	8.7
切替後の ロープ荷重, kN	34.6		0.81	0.75	0.66
	26.0	0.99		0.75	0.70
	17.3	1.05	0.90		0.66
	8.7	1.35	1.16	1.05	
切替時の回数		切替前のロープ荷重, kN			
9000 cycles		34.6	26.0	17.3	8.7
切替後の ロープ荷重, kN	34.6				0.75
	26.0				0.57
	17.3				0.61
	8.7				

$$D = \frac{1500}{7745} + \frac{(9238 - 1500)}{10687} = 0.92 \quad (2)$$

となる。さて、線形累積損傷則が成立すれば、製造ロットによるばらつきを考慮しても損傷度 D は約 1.0 になるものと考えられるが、0.7 から 0.8 となる結果が多く、最大は 1.42、最小は 0.57 である。なお、切替時の回数にかかわらず、34.6 kN から 8.65 kN に切り替わる試験において、損傷度 D は 1.4 程度であり、最も大きくなる傾向を示している。また、高荷重側から低荷重側に切り替えた試験においては、 $D > 1.0$ になる傾向にある。ここで、上記①から③の条件によって破断したワイヤロープに負荷されたロープ荷重は 2 水準あることから、ロープ荷重と破断寿命と直接結びつけて評価することができない。そこで破断寿命のうち、③に示す荷重切替時まで繰返し数と、荷重切替後から破断するまでの繰返し数の割合をそれぞれのロープ荷重に乗ずることで、定常のロープ荷重を負荷したものとして等価ロープ荷重 T_{eq} を次式により求めている。

$$T_{eq} = \frac{1}{N_f} \cdot \sum_{i=1}^n T_i \cdot n_i \quad (3)$$

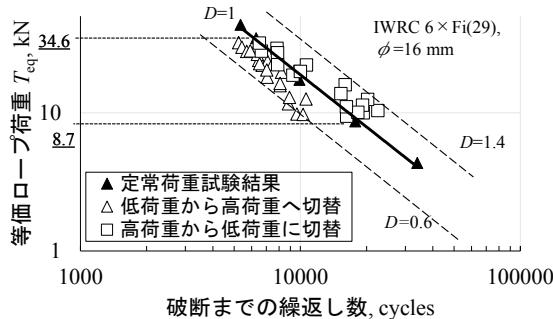


図 8 等価ロープ荷重 T_{eq} と破断までの繰返し数の関係
(ロープ荷重 : 2 水準)

ここで、 N_f : 破断繰返し数、 T_i : ロープ荷重、 n_i : T_i が負荷された回数である。

図 8 に、表 2 に示した試験結果から計算される T_{eq} と破断までの繰返し数の関係を示す。図中の定常荷重試験により得られた疲労試験結果は $D=1$ として示している。切替後のロープ荷重が高荷重側となる場合、破断寿命は $D=1$ 未満であった。一方で、切替後の荷重が低荷重側となる場合、多くの破断寿命は $D=1$ 以上であった。全体として $D=1$ に対して、 $\pm 40\%$ の範囲でばらついているが、 T_{eq} が高い領域では、 $D=1$ に近づく傾向にある。一方、 T_{eq} が低い領域においては、 $D=1$ から離れる傾向にあるといった特徴が見られる。これらの要因として以下が考えられる。

- ・ 低荷重側で試験を開始し、素線にき裂が発生した後に、高荷重側に切替ええたことで、き裂の進展速度が増大し、 $D=1$ 未満で破断する。
- ・ 高荷重側で試験を開始し、素線にき裂が発生した際、き裂の先端に形成された塑性域により、低荷重側に切替えたことでき裂進展が遅延し、 $D=1$ 以上で破断する。
- ・ 低荷重側では試験シーブ通過時に発生する曲げ荷重によるフレッティング疲労が支配的である。一方、高荷重側では繰返し疲労が支配的である。

上記は推定される要因であり、今後、試験を途中で止め、素線の破断面観察等を実施するなどの検証が必要と考える。

次に、以下の条件でロープ荷重を変動させ、ワイヤロープが破断するまで S 曲げ疲労試験を実施している。これを変動荷重試験 A とする。

- ① ロープ荷重は 34.6 kN, 26.0 kN, 17.3 kN, 8.7 kN
- ② 設定した 4 水準のロープ荷重のうち、2 水準、3 水準または 4 水準の荷重が 1 cycle 毎にランダムで切替
- ③ 各水準の荷重が作用する回数は概ね均等となるよう調整（なお、各水準の荷重が無作為にかつ均等に負荷されるよう 99 cycles または 100 cycles が 1 set となる負荷条件を作成して、破断するまで当該 set が繰り返される）

表 4 変動荷重（複数切替）試験の試験結果
(IWRC 6×Fi(29), S 曲げ疲労試験)

ロープ荷重, kN		損傷度 D	等価ロープ荷重 T_{eq} , kN	破断繰返し数 N_f , cycles
8.7	17.3	26.0	34.6	
25.0	25.0	25.0	25.0	0.93
25.0	25.0	25.0	25.0	0.92
33.3	33.3	33.3	33.3	0.89
33.3	33.3	33.3	33.3	1.02
33.3	33.3	33.3	33.3	0.89
33.3		33.3	33.3	0.95
	50.0	50.0	50.0	1.13
50.0	50.0		50.0	1.05
50.0		50.0	50.0	0.85
50.0		50.0	50.0	0.88
50.0		50.0	50.0	0.92
50.0	50.0		50.0	21.6
	50.0	50.0	50.0	1.05
			50.0	21.6
				9422

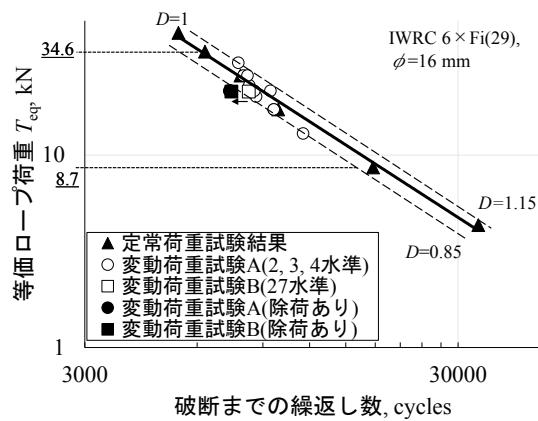


図 9 等価ロープ荷重 T_{eq} と破断までの繰返し数の関係
(試験荷重 : ランダム, S 曲げ疲労試験)

なお、 T_{eq} は式(3)により算出する。

表 4 に変動荷重試験の結果を示す。損傷度 $D=1$ にはならなかったが、表 3 と比べると明らかに $D=1$ に収束しており、最大は 1.13、最小は 0.85 である。2 水準の荷重しか作用しない場合であっても、ランダムで作用することで、 $D=1$ に収束する傾向が得られた。図 9 に T_{eq} と破断までの繰返し数の関係を示すが、 $D=1$ に対して当然のことながら $\pm 15\%$ 未満に収まっていることが分かる。

実際のクレーン等の稼働においては、荷をつり上げ、移動させた後に荷を下ろすことから、無負荷の状態が生じる。そこで、次の条件で試験を実施している。これを変動荷重試験 A (除荷あり) とする。

- ① ロープ荷重 34.6 kN, 26.0 kN, 17.3 kN, 8.7 kN が概ね均等回数負荷されるよう調整（なお、各水準の荷重が無作為にかつ均等に負荷されるよう 99 cycles または 100 cycles が 1 set となる負荷条件を作成して、破断するまで当該 set が繰り返される）
- ② 設定した 4 水準の荷重は 1 cycle 每にランダムで切替
- ③ 荷重切替時には除荷ステップとして 0.5 kN までロープ荷重が低下、4 水準のロープ荷重が作用す

る条件でのみ実施

また、以下のように荷重の水準を変更した試験も実施している。これを変動荷重試験Bおよび変動荷重試験B(除荷あり)とする。

- ① ロープ荷重は8.6 kN - 34.6 kNの間で1 kN毎に(27水準に)分割され、概ね均等回数負荷されるよう調整(なお、各水準の荷重が無作為にかつ均等に負荷されるよう108cyclesが1setとなる負荷条件を作成して、破断するまで当該setが繰り返される)
- ② 設定した27水準の荷重は1cycle毎にランダムで切替
- ③ 荷重切替時には、除荷ステップがないもの、および除荷ステップとして0.5 kNまでロープ荷重が低下するものをそれぞれ実施

試験結果を図9に示す。まず、変動荷重試験Bにおいては、破断繰返し数が8242cyclesであり、表4において4水準のロープ荷重が負荷割合25%ずつである試験結果と大きな差はない。したがって、本報告で示すようなS曲げにおける変動荷重試験においては、荷重ステップは4水準で設定すれば十分と考えられる。次に、除荷ステップを考慮した試験結果に注目する。検証数は2点ではあるが、いずれも破断寿命が低下しており、 $D=0.8$ 程度となることが分かる。除荷ステップが入ることで、ロープに作用する荷重差が大きくなり、これが破断寿命を早めた要因として考えられる。今後は、同試験の試行回数を増やして再現性を確認するとともに、有限要素解析によるワイヤロープ内部の応力状態に及ぼす除荷ステップの影響の調査などから検証していく必要があると考えられる。

次に、U曲げ試験においても線形累積損傷則が成立するか確認するため、IWRC 6×Fi(29)を対象に、以下の条件でロープ荷重を変動させる試験を実施している。これを変動荷重試験Aとする。

- ① ロープ荷重は34.6 kN, 26.0 kN, 17.3 kN, 8.7 kN
- ② 設定した4水準のロープ荷重のうち、2水準、3水準または4水準の荷重が1cycle毎にランダムで切替
- ③ 各水準の荷重が作用する回数は概ね均等となるよう調整(なお、各水準の荷重が無作為にかつ均等に負荷されるよう99cyclesまたは100cyclesが1setとなる負荷条件を作成して、破断するまで当該setが繰り返される)

表5に変動荷重試験の結果を示す。S曲げ疲労試験結果と異なり、すべての試験結果において、損傷度 $D < 1$ となっており、最大は0.95、最小は0.55である。図10に T_{eq} と破断までの繰返し数の関係を示すが、多くは $D=0.6$ から $D=0.7$ にある。U曲げが作用する状態においては、定常荷重試験により得られた試験結果では危険側の評価になると考えられる。ここで、S曲げの変動荷重試験と同様、以下の条件で追加の試験を実施してい

表5 変動荷重(複数切替)試験の試験結果

(IWRC 6×Fi(29), U曲げ疲労試験)

ロープ荷重, kN	等価ロープ荷重 T_{eq} , kN	損傷度 D	等価ロープ荷重 T_{eq} , kN		破断繰返し数 N_f , cycles
			8.65	17.3	
25.0	25.0	0.55	21.6	25279	
33.3	33.3	0.59	17.3	38366	
	33.3	0.81	26.0	29464	
33.3	33.3	0.59	20.2	28912	
33.3	33.3	0.66	23.1	27011	
	50.0	0.95	30.3	27872	
50.0	50.0	0.74	26.0	26755	
50.0	50.0	0.62	13.0	62549	
50.0	50.0	0.67	17.3	41992	
50.0	50.0	0.63	21.6	27360	
50.0	50.0	0.82	21.6	39942	

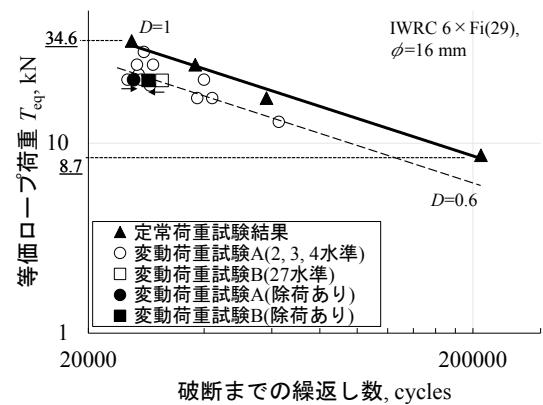


図10 等価ロープ荷重 T_{eq} と破断までの繰返し数の関係
(試験荷重: ランダム, U曲げ疲労試験)

る。これを変動荷重試験A(除荷あり)とする。

- ① ロープ荷重34.6 kN, 26.0 kN, 17.3 kN, 8.7 kNが概ね均等回数負荷されるよう調整(なお、各水準の荷重が無作為にかつ均等に負荷されるよう99cyclesまたは100cyclesが1setとなる負荷条件を作成して、破断するまで当該setが繰り返される)
- ② 設定した4水準の荷重は1cycle毎にランダムで切替
- ③ 荷重切替時には、除荷ステップとして0.5 kNまでロープ荷重が低下、4水準のロープ荷重が作用する条件でのみ実施

また、以下の試験も実施している。これを変動荷重試験Bおよび変動荷重試験B(除荷あり)とする。

- ① ロープ荷重は8.6 kN - 34.6 kNの間で1 kN毎に(27水準に)分割され、概ね均等回数負荷されるよう調整(なお、各水準の荷重が無作為にかつ均等に負荷されるよう108cyclesが1setとなる負荷条件を作成して、破断するまで当該setが繰り返される)
- ② 設定した27水準の荷重は1cycle毎にランダムで切替
- ③ 荷重切替時には除荷ステップがないもの、およ



図 11 損傷ロープの外観の一例

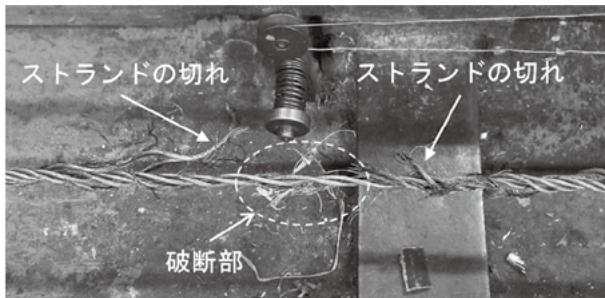


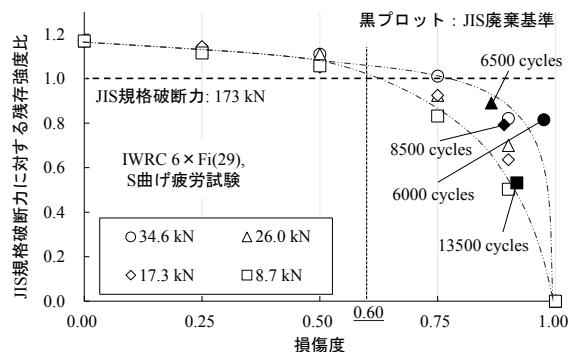
図 12 破断力試験後の損傷ロープの一例

び除荷ステップとして 0.5 kN までロープ荷重が低下するものをそれぞれ実施

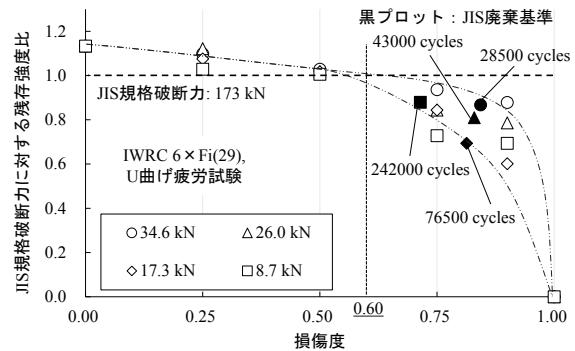
試験結果を図 10 に示す。変動荷重試験 B においては、破断繰返し数が 31076 cycles であり、 $D=0.6$ 程度であることから、表 5 に示される変動荷重試験の結果と大きな差はない。次に、除荷ステップを考慮した試験結果に注目する。検証数は 2 点であり、変動荷重試験 A (除荷あり) の場合、除荷ステップを加えたことで、25279 cycles から 26206 cycles となった。破断までの繰返し数としては増加しているが、両者の差は 3%程度であり、ばらつきの範囲と考えられる。一方、変動荷重試験 B (除荷あり) の場合、除荷ステップを追加することで、31076 cycles から 28598 cycles となり、破断までの繰返し数は低下している。ただし、両者の差は 8%程度であり、これもばらつきの範囲と考えられる。U 曲げの場合、試験条件として除荷ステップを加えても疲労寿命に対する明確な影響は確認されない。ばらつきの範囲内であれば、除荷ステップを考慮した試験を実施する必要はなく、同試験の短縮化を検討できるが、これについては試行回数を増やし、検証する必要がある。

5. 損傷度と残存強度の関係

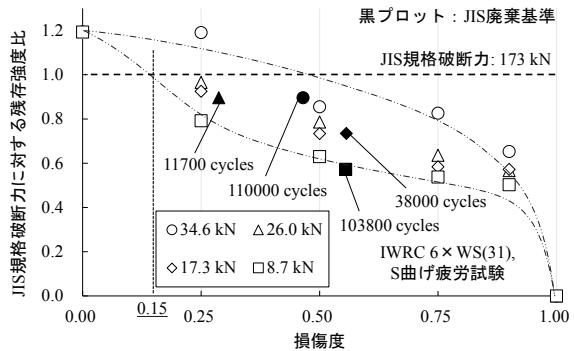
ここでは、線形累積損傷則における損傷度とワイヤロープの残存強度の関係に着目し、ワイヤロープの交換時期について検討している。式(1)から、定常荷重下の疲労試験により得られる損傷度は $D=1$ と計算される。そこで、損傷度とワイヤロープの残存強度の関係を評価するため、 $D=0.90$, $D=0.75$, $D=0.50$, $D=0.25$ 相当のワイヤロープ (以下、損傷ロープ) を作成している。なお、損傷ロープは定常荷重下の疲労試験によって得



(a) IWRC 6×Fi(29), S 曲げ疲労試験



(b) IWRC 6×Fi(29), U 曲げ疲労試験



(c) IWRC 6×WS(31), S 曲げ疲労試験

図 13 損傷度と残存強度の関係

ている。図 11 に一例として、損傷ロープの外観を示す。谷部 (Nip) で素線が断線して飛び出していることが確認できる。ここで、 $D=0.90$ の損傷ロープとは、ロープ荷重を負荷するアクチュエータの変位量を基準として、ワイヤロープが破断直前の変位量に達したところで試験を停止して作成されたロープとする¹⁰。また、これらに加えて JIS³⁾に規定されるワイヤロープの廃棄基準に到達した損傷ロープ¹¹⁾を作成している。ここでは、廃棄基準の一つである可視素線断線数の到達を基準にしている。IWRC 6×Fi(29)の場合、 $6d_R$ の長さにおいて 6 本以上、または $30d_R$ の長さにおいて 11 本以上の可視素線断線数が認められたときである。また、IWRC 6×WS(31)の場合、 $6d_R$ の長さにおいて 6 本以上、または $30d_R$ の長さにおいて 13 本以上の可視素線断線数が認

められたときである。さらに、これらとは別に、共通して $6d_R$ の長さにおいて谷部断線（Nip 断線）が2本以上認められたときもまた、試験を止めている。損傷ロープは以下の試験条件のもと取得している。

- ① ロープ荷重は、34.6 kN, 26.0 kN, 17.3 kN, 8.7 kN の4水準
- ② IWRC 6×Fi(29)を対象とした S 曲げ疲労試験、U 曲げ疲労試験、および IWRC 6×WS(31)を対象とした S 曲げ疲労試験

損傷ロープの残存強度は、JIS⁵⁾に準じた破断力試験により取得している。図 12 に破断力試験直後の様子を示す。多くは損傷ロープの中央部で破断している。図 13 に各試験条件における損傷度と残存強度比の関係を示す。縦軸の残存強度比は、損傷ロープの破断力を規格破断力 173 kN で除した値である。したがって、残存強度比が 1.0 は、規格破断力 173 kN と同等の残存強度を有していることを示す。 $D=0$ は、未使用ロープを破断力試験に供したものであり、3 回の破断力試験から得られた破断力の平均値を採用している。規格破断力と比べて 15 - 20%ほど破断力が高いことが分かる。IWRC 6 × Fi(29)では、S 曲げ、U 曲げにかかわらず、いずれのロープ荷重においても $D=0.5$ まではほぼ直線的に低下し、 $D=0.5$ 以降は損傷度が大きくなるにつれ、残存強度の低下幅が大きくなる。また、 $D=0.6$ 程度で規格破断力 173 kN まで低下する傾向が見られる。したがって、損傷度が $D=0.7$ に達するときには、規格破断力を満足しない。また、JIS 廃棄基準に達した損傷ロープは、いずれも “ $6 d_R$ の長さにおいて谷断線が 2 本以上” に達したものであり、その残存強度比は 0.5 - 0.9 にある。また、このときの損傷度は概ね $D=0.8$ 以上である。このことから、実際のクレーンで IWRC 6 × Fi(29)が使用される場合において、目視検査により谷断線を見逃すと、ワイヤロープが切れるまで猶予がなく、注意が必要といえる。また、数十 m 以上あるワイヤロープの目視検査を行うことは現実的ではないことから、損傷度を基準に廃棄時期を推定することは有効であると考えられる。以上のことから、S 曲げまたは U 曲げを受ける状態で IWRC 6 × Fi(29)が使用される場合、損傷度 $D=0.6$ 未満は、規格破断力ひいては安全率を概ね満足した状態であると考えられる。ただし、損傷度を目安に廃棄時期を推定する場合は、ワイヤロープに負荷された荷重やつり上げ回数等を記録しておく必要があると考える¹⁰⁾。

一方、S 曲げを受けた IWRC 6 × WS(31)の残存強度は、ロープ荷重により大きく異なり、ロープ荷重が小さいほど残存強度の低下率が大きい。また、JIS 廃棄基準に達した損傷ロープは、いずれも “ $6 d_R$ の長さにおいて谷断線が 2 本以上” に達しており、その残存強度比は 0.5 - 0.9 にある。また、このときの損傷度はいずれも $D=0.6$ 未満である。IWRC 6 × Fi(29)の結果と比べて廃棄基準に到達してから破断するまでには猶予があることから、廃棄基準に到達したことを見逃したことで、ワイヤロープが短時間で破断することは起こりにくいものと

推定される。一方で、一部の結果は破断寿命の $D=0.3$ 未満で JIS 廃棄基準に達するか、規格破断力を下回る残存強度しか有していないものと考えられるが、この時点でのワイヤロープを交換することは、安全側の評価となる一方、経済的ではない側面がある。

6. 変動荷重試験結果および残存強度から推定されるワイヤロープの交換時期

前述したように、損傷度を目安に廃棄時期を推定する場合は、ワイヤロープに負荷された荷重やつり上げ回数等を記録しておく必要がある。そこで、IWRC 6 × Fi(29)を対象に、変動荷重試験結果および残存強度試験結果から推定される交換時期を検討する。まず、図 14 より S 曲げ疲労試験においては、 $D=1$ に対して、土 15%で収束しており、線形累積損傷則が概ね成立するが、実際のクレーン等の稼働を想定し、無負荷の状態を考慮すると $D=0.8$ となる。次に、図 15 に示す損傷度と残存強度比の関係から、 $D=0.6$ 程度までは JIS で規定される規格破断力を有している。一方で、 $D=0.75$ までは規格破断力の 8割程度の残存強度を有しており、安全率を考慮すれば $D=0.75$ 程度までは破断に対して猶予があると考えられる。したがって、製造ロットによる破断力

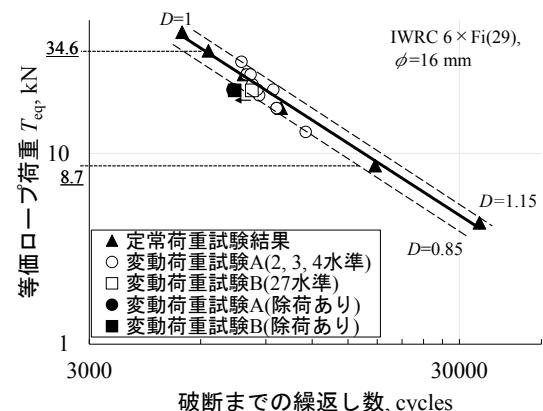


図 14 等価ロープ荷重 T_{eq} と破断までの繰返し数の関係
(試験荷重 : ランダム, S 曲げ疲労試験)
(図 9 再掲)

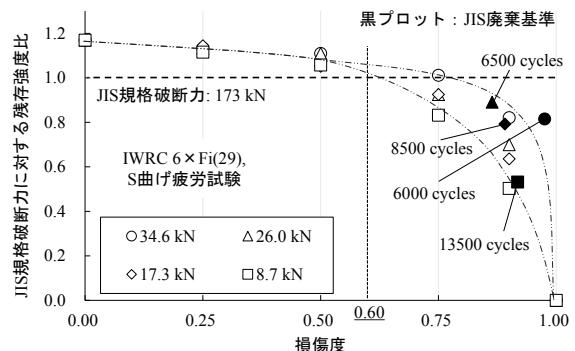


図 15 S 曲げ疲労試験により得られた損傷度と残存強度の関係 (図 13(a) 再掲)

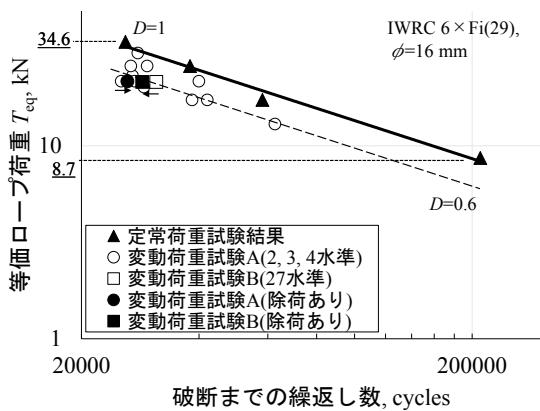


図 16 等価ロープ荷重 T_{eq} と破断までの繰返し数の関係
(試験荷重: ランダム, U 曲げ疲労試験)
(図 10 再掲)

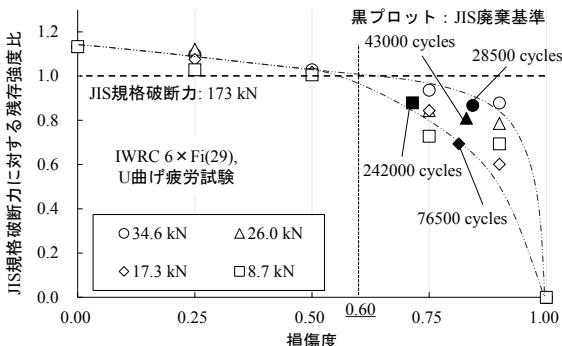


図 17 U 曲げ疲労試験により得られた損傷度と残存強度の関係 (図 13(b) 再掲)

のばらつきを考慮しても、 $D=0.7$ 程度までは使用に耐えるものと考えられる。使用履歴から損傷度を算出でき、かつ S 曲げを受けるワイヤロープである場合、 $D=0.6$ 程度に到達したときに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。

同様に、U 曲げについて検討する。図 16 に示す U 曲げ疲労試験結果においては、線形累積損傷則が成立せず、無負荷の状態を考慮すると $D=0.6$ 程度に収束するように見られる。次に、図 17 に示す損傷度と残存強度評価の関係から、 $D=0.6$ 程度までは JIS で規定される規格破断力を有している。一方で、 $D=0.7$ までは規格破断力の 8割程度の残存強度を有しており、安全率を考慮すれば破断に対して十分に猶予があると考えられる。使用履歴から損傷度を算出でき、かつ U 曲げを受けるワイヤロープである場合、 $D=0.5$ 程度を目安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。なお、使用履歴が不明なものは、JIS 廃棄基準よりも厳しい評価で交換するか、非破壊検査装置^{2, 11)}を導入のうえ、素線の断線状態から残存強度を推定する手法が有効と考えられる。例えば、同特別研

究の別報「ワイヤロープ損傷検出による寿命および残存強度予測」では、素線の断線状態から残存強度を推定する手法について検討しており、ワイヤロープが破断する前に交換するための手法として有効と考えられる。

7. おわりに

クレーン用ワイヤロープの破断寿命や交換時期を推定するために、実際のクレーン等の稼働を想定した上でのワイヤロープの S 曲げ疲労試験および U 曲げ疲労試験を行い、線形累積損傷則の成立の成否を確認するとともに、ワイヤロープの損傷度と残存強度の関係を明らかにしている。以下に、得られた成果を示す。

- 1) 製造ロットが異なる IWRC 6×Fi(29)を複数入手し、S 曲げ疲労試験に供したところ、製造ロットによって破断寿命が異なること、および疲労特性の傾きに差があることが確認されている。また、破断力試験を実施したところ、疲労強度と破断力の大小関係は一致している。ワイヤロープは多数の素線がより合わせて構成されており、素線の材質や線径、型付率などが疲労強度や破断力に影響しているものと考えられる。
- 2) 新たに開発した往復駆動型ワイヤロープ疲労試験機は、従来の回転駆動型ワイヤロープ疲労試験機と同等の性能を有するものであり、かつ、実際のクレーン等の巻上げ、巻下げ操作によるワイヤロープの往復挙動を再現できる。
- 3) IWRC 6×Fi(29)を対象に、変動荷重が負荷される S 曲げ疲労試験から得られた疲労特性は、 $D=1$ に対して $\pm 15\%$ で収束しており、線形累積損傷則が概ね成立するよう見られる。なお、実際のクレーン等の稼働を想定し、変動荷重および無負荷の状態（除荷ステップ）を考慮した S 曲げ疲労試験により得られた破断寿命から、損傷度は $D=0.8$ となる。
- 4) IWRC 6×Fi(29)を対象に、変動荷重が負荷される U 曲げ疲労試験から得られた疲労特性は、多くは $D=0.6$ から $D=0.7$ にある。なお、S 曲げ疲労試験同様、変動荷重および無負荷の状態を考慮した U 曲げ疲労試験から得られた破断寿命に大きな差はなく、製造ロットによるばらつきの範囲内であると考えられる。
- 5) 破断力試験により、損傷度と残存強度について調査したところ、IWRC 6×Fi(29)では、S 曲げ、U 曲げにかかわらず、いずれのロープ荷重においても $D=0.5$ まではほぼ直線的に低下し、 $D=0.5$ 以降は損傷度が大きくなるにつれ、残存強度の低下幅が大きくなる。また、 $D=0.6$ 程度で規格破断力 173 kNまで低下する傾向が見られる。一方、S 曲げを受けた IWRC 6×WS(31)では、ロープ荷重が小さいほど残存強度の低下率が大きい結果が得られている。
- 6) IWRC 6×Fi(29)を対象に、変動荷重試験結果および

残存強度試験結果から交換時期の推定を試みている。変動荷重試験により得られる破断寿命は $D=0.8$ であること、残存強度試験により $D=0.6$ 程度までは JIS で規定される規格破断力を有していることが確認できる。使用履歴から損傷度を算出でき、かつ S 曲げを受けるワイヤロープである場合、 $D=0.6$ 程度に到達したときに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。

謝　　辞

株式会社神戸工業試験場の倉橋氏には、S 曲げ疲労試験および U 曲げ疲労試験を実施する上で、試験補助をいただきました。末筆ながらここに記して謝意を表します。

参　考　文　献

- 1) 厚生労働省、クレーン構造規格、2019.
- 2) 本田尚、山口篤志、山際謙太、佐々木哲也，“動索の経年損傷評価”，労働安全衛生総合研究所特別研究報告 JNIOSH-SRR-NO. 44 (2014), pp. 5-17.
- 3) 日本規格協会、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。
- 4) 小寺沢良一，“<改定増補>材料強度学要論”，(2002)，朝倉書店，pp.138-145.
- 5) 日本規格協会、JIS G 3525:2013、ワイヤロープ。
- 6) 緒方公俊、山口篤志、山際謙太、佐々木哲也、泉聰志，“素線形状の幾何学的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 (2022), p.22-00038.
- 7) 谷口運、山際謙太，“ワイヤロープ技術発展の系統化調査の報告(5)-技術発展の系統化調査の転載第4回目-”，クレーン, 55巻, 6号, (2017), pp.11-21.
- 8) 西岡多三郎、西岡猛，“鉱山用ロープの型付けとうねりとの関係”，日本鉱業会誌, 83巻, 950号, (1967), pp.800-805.
- 9) 安積耕司，“移動式クレーン巻上索の絡みつき抑制について”，クレーン, 55巻, 2号, (2017), pp.43-50.
- 10) 山口篤志、緒方公俊、山際謙太、佐々木哲也，“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, (2023), 講演番号 S171-05.
- 11) 例えは、山口篤志、緒方公俊、本田尚、山際謙太“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)” 日本機械学会年次大会, (2024), 講演番号 S171-07.