

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

Evaluation of damage of conventional and new material ropes used for cranes and reconsideration of discard codes for wire ropes

本田 尚^{*1} 山際謙太^{*1} 山口篤志^{*1} 佐々木哲也^{*1} (機械システム安全研究グループ)

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

クレーンに使用されるワイヤロープが切断し、吊荷の落下やジブの折損による労働災害が後を絶たない。細い鋼線（素線）を数多く束ねたワイヤロープは、使用しているうちに少しずつ素線が断線し、強度が低下する。しかし、ワイヤロープはその複雑な構造のために、断線のメカニズムは十分に解明されていない。そこで、クレーンに使用されるワイヤロープを動索と静索に分類し、それぞれ用途に適した方法で経年損傷評価を行った。動索は、天井クレーンの巻上ロープや移動式クレーンのジブ起伏ロープに多く使用される2種類の鋼心ワイヤロープについてS字曲げ疲労試験を行い、経年損傷のメカニズムと経年損傷に及ぼす張力の影響を調査した。その結果、いずれのワイヤロープもワイヤロープ内部から断線が進行し、張力が小さいほど、内部から断線が進行する傾向にあることが判明した。また、静索は、移動式クレーンのペンダントロープとして炭素繊維ロープの使用が検討されている。しかし、国内には炭素繊維ロープに対する安全基準がなく、安全基準策定の基礎となる強度データが求められている。そこで、炭素繊維ロープの引張疲労試験を行い、疲労強度を明らかにするとともに損傷メカニズムの解明を行った。疲労試験の結果、炭素繊維ロープの疲労限度は引張強さの約1/3であり、従来の鋼製ワイヤロープと同等の疲労強度を有していることが判明した。これらの成果はクレーン構造規格、移動式クレーン構造規格およびJIS規格原案といった国内の規格改正はもとより、ISO規格の改正に資する。

1 研究の背景

クレーンが関係する死亡災害は、本プロジェクト研究を計画した平成20年は101件発生しており、これは全産業の死亡者数の約8%を占める。このうち、ワイヤロープの切断による死亡災害は10件と、クレーン死亡災害の約10%を占めている(図1)。また、筆者らの研究グループが労働基準監督署等の依頼により行ったクレーン災害調査は、平成20年から平成25年までに17件あり、そのうちワイヤロープに起因するものは4件と、ほぼ年間1件のペースで調査を行っている。

我が国においては、クレーン災害の防止を目的として昭和37年にクレーン構造規格と移動式クレーン構造規格が制定され、昭和51年および平成8年に大きく改正されている。しかし、最後の改正からすでに20年近く経過しており、この間、クレーンの技術は大きく進歩し、特に近年は高荷重、高揚程に対応するために、巻上ロープやジブ起伏ロープに高強度でロープ径の小さいワイヤロープを使用する傾向がある。これに対応するため、ワイヤロープの心綱は従来の繊維心から強度のある鋼心へ変更されている。この心綱の変更によって、ワイヤロー

プの経年損傷特性は大きく変化している。したがって、ワイヤロープに起因するクレーン災害を減少するには、現在クレーンで主として利用されている鋼心ワイヤロープの経年損傷特性に則して廃棄基準を改正する必要がある。

また、移動式クレーンでは、高揚程化に伴って伸長されたジブを軽量化するため、ペンダントロープに炭素繊維

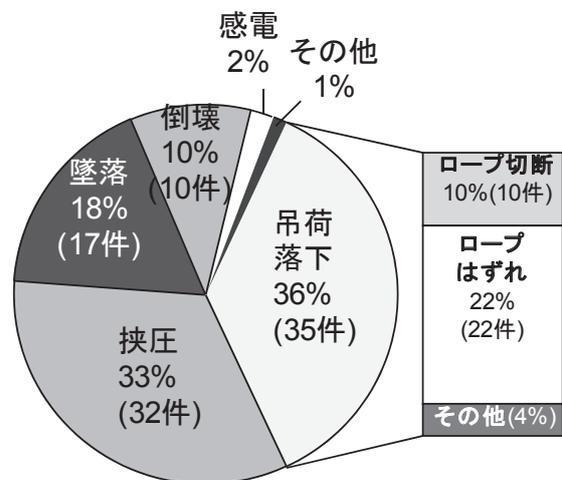


図1 平成20年度クレーン死亡災害(出典:平成20年度クレーン年鑑)

*1 Mechanical System Safety Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health

維など軽量かつ高強度な新素材を適用することが検討されている。すでにドイツでは一部のメーカーにおいて炭素繊維ロープの実用化が進んでいる。しかし、我が国では炭素繊維ロープをクレーンに使用した場合の安全性は検討されておらず、炭素繊維ロープの安全基準および廃棄基準は存在しない。

このようにクレーン技術の高度化によって、従来材ワイヤロープについては廃棄基準の見直し、また炭素繊維を使用した新素材ロープについては、安全基準および廃棄基準の早急な整備が社会的に求められている。

2 研究の概要

クレーンに使用されるワイヤロープは、図2のように大きく動索と静索の2種類に分類される。動索は、動力を伝えることを目的としたワイヤロープであり、ドラムに巻かれ、シーブ（滑車）を通過することで、曲げ・曲げ戻し変形を受ける。天井クレーンの巻上ロープや移動式クレーンのジブ起伏ロープがこれに相当する。一方、静索は構造部材として荷重を支えることを目的とし、移動式クレーンのペンダントロープがこれに相当する。動索と静索では目的と用途が全く異なることから、実験方法や経年損傷の評価方法も大きく異なる。そこで、本研究は動索と静索の経年損傷をそれぞれサブテーマとし、使用目的および使用方法に応じた実験手法で経年損傷を評価する。

以下、各サブテーマの概要を述べる。

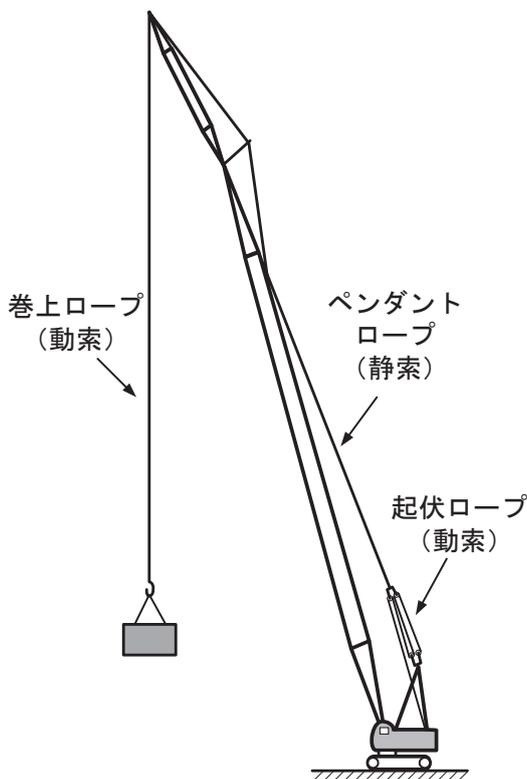


図2 クレーンの動索と静索の例

1) 動索の経年損傷評価

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、心綱にワイヤを採用した鋼心ワイヤロープが使用される。鋼心ワイヤロープは従来の繊維心ワイヤロープに比べ、ワイヤロープ内部に断線が発生しやすく、定期自主検査等で素線の断線を検出することが難しい。このことが、ワイヤロープ切断災害の原因となっている。したがって、同種の災害を防止するには、ロープ表面の素線の断線数（可視断線数）と内部の素線断線数（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、吊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、異なる張力下で疲労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、動索に多用されるフィラー形鋼心ワイヤロープ IWRC (Independent Wire Rope Core) 6×Fi(29)と、ウォリントンシール形ワイヤロープ IWRC 6×WS(31)の2種類の鋼心ワイヤロープについて、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。

S字曲げ疲労試験の結果、IWRC 6×Fi(29)は可視断線が発生した時点で、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ていることが判明した。この素線断線数はロープ張力が小さくなるほど増加する傾向があり、張力を破断荷重の1/5から1/20に小さくすると、素線断線数は2倍になる。一方、IWRC 6×WS(31)はロープ張力によって可視断線数と総断線数の関係に大きな変化はみられない。しかし、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、ロープ張力が大きくなるほど素線断線が急激に進行する。

このように、ワイヤロープの寿命はワイヤロープの種類と作用するロープ張力によって大きく異なり、素線断線数のみを廃棄基準とすることは非常に危険である。そこで、ワイヤロープの疲労試験結果をロープ張力を縦軸に、破断までにシーブを通過した回数の対数を横軸として整理したところ、ワイヤロープの種類に関係なく、両者の間に直線関係が成立することが判明した。したがって、動索の経年損傷は素線断線数ではなく、ロープ張力の大きさとシーブ通過回数から評価できる。

2) 静索の経年損傷評価

クレーンのジブ起伏に使用されている静索（ペンダントロープ）に、軽量化と工期短縮を目的として、炭素繊維複合材料ケーブル（Carbon Fiber Composite Cable、以下「CFCC」と略す）を応用したCFペンダントの利用が期待されている。CFCCは現在のところジブの起伏といった変動荷重下での使用については実績が無いことから、CFペンダントの繰返し軸荷重試験を行い、荷重範囲と破断に至る繰返し数の関係を求めた。CFペンダントは破断荷重400kN全長500mm（以下、400kN試験片と呼ぶ）と、破断荷重200kN全長1200mm（以下、200kN試験片と呼ぶ）の2種類を用意した。試験の応力比は0.1、室温大気中、

試験打ち切り繰返し数は 200 万回の条件で荷重一定の試験を行った。その結果は、一般的な鋼材の疲労試験で得られる $S-N$ 線図と同様であった。また、疲労限に相当する荷重範囲は最大荷重が破断荷重の約 30%の時であった。すなわち、400kN 試験片では荷重範囲が 108kN、200kN 試験片では 54kN 以下では破断しない。これらの結果は CF ペンダントの廃棄基準などを決めるための基礎的な資料として活用される予定である。

3 今後の課題

サブテーマ「動索の経年損傷評価」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。しかし、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る。したがって、今回提案したワイヤロープの余寿命評価法の精度を向上させるには、ブロック荷重など荷重が変動した場合に累積損傷則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。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。

サブテーマ「静索の経年損傷評価」では、CF ペンダントの荷重範囲と破断する繰返し数についての関係は明らかになった。今後は、廃棄基準を策定するために、例えば鋼製ロープでは素線の断線数などが廃棄基準の一つであるが、同様に CF ペンダントにおいても繰返し数と劣化を示す現象との関係をより具体的にする必要があり

研究業績リスト

課題名: 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

平成25年度(2013年)		
1	原著論文	山際 謙太, 大山 裕太, 佐々木 哲也, 本田 尚, 山口 篤志, 辻 裕一 (2013) 静索用炭素繊維複合材料ケーブルの繰返し軸荷重試験, 日本機械学会A編ノート, Vol.79, No. 802, p. 745-748
2	国内外の研究集会発表	Kenta Yamagiwa (2013) Cyclic tensile loading test of CF (Carbon Fiber) Pendant, 12th Holistic Structural Integrity Process, 2013/Mar, Utah, USA
3	国内外の研究集会発表	Kenta Yamagiwa, Tetsuya Sasaki (2013) Estimation of Stress Ratio from Striation's Three-Dimensional Geometry, ASME 2013 Pressure Vessels & Piping Division Conference, Paris, France
4	国内外の研究集会発表	本田 尚, 佐々木 哲也, 山際謙太, 山口篤志 (2013) 鋼心ワイヤロープの断線数と残存強度の関係, 資源素材2013秋季大会, 2013/09, 札幌
5	国内外の研究集会発表	山際謙太 (2013) 炭素繊維複合材を応用したペンダントロープの繰返し軸荷重強度特性, 資源素材2013秋季大会, 2013/09, 札幌
6	国内外の研究集会発表	本田 尚, 佐々木 哲也, 山際謙太, 山口篤志 (2013) ウォリントン・シール形鋼心ワイヤロープの疲労損傷に及ぼす張力の影響, 日本機械学会材力部門講演会 M&M 2013, 2013/10, 岐阜
7	国内外の研究集会発表	山際謙太, 本田 尚, 佐々木 哲也, 山口篤志 (2013) 炭素繊維複合材料ケーブルの繰返し軸荷重試験, 日本機械学会材力部門講演会 M&M 2013, 2013/10, 岐阜
8	国内外の研究集会発表	本田尚, 佐々木 哲也, 山際謙太, 山口篤志 (2013) 従来材およ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に関する研究, 一般社団法人日本クレーン協会ワイヤロープ委員会, 2013/11, 東京
9	国内外の研究集会発表	本田 尚, 佐々木 哲也, 山際謙太, 山口篤志 (2013) 鋼心ワイヤロープの曲げ疲労特性と残存強度に及ぼす張力の影響, 第46回安全工学研究発表会, 2013/11, 高松
10	国内外の研究集会発表	山際謙太, 本田 尚, 佐々木 哲也, 山口篤志 (2013) 炭素繊維複合材を応用したペンダントロープの繰返し強度特性, 第46回安全工学研究発表会, 2013/11, 高松
11	その他の専門家向け出版物	山際謙太 (2013) 炭素繊維ケーブルを使用したペンダントロープと, その繰返し荷重特性, クレーン, Vol. 51, No. 589 (2013年4月号)
12	その他の専門家向け出版物	本田尚 (2014) 溶接継手の疲労強度(1) -応力集中について-, クレーン, Vol. 52, No. 600 (2014年3月号)
13	その他の専門家向け出版物	本田尚 (2014) 溶接継手の疲労強度(2) -疲労強度の改善方法について-, クレーン, Vol. 52, No. 601 (2014年4月号)
平成24年度(2012年)		
1	国内外の研究集会発表	Kenta Yamagiwa (2012) Failure mode of Steel Wire Rope and Carbon Fiber Composite Cable (CFCC), 11th Holistic Structural Integrity Process, 2012/Mar, Utah, USA
2	国内外の研究集会発表	本田 尚, 佐々木 哲也, 他機関 (2012) 鋼心ワイヤロープの疲労損傷に及ぼす繰返し速度の影響, 安全工学シンポジウム, 2012/07, 東京
3	国内外の研究集会発表	本田 尚, 佐々木 哲也, 山際謙太, 山口篤志 (2012) フィラー形鋼心ワイヤロープの内部断線の特徴と張力の関係, 安全工学シンポジウム, 2012/07, 東京
4	国内外の研究集会発表	本田 尚, 佐々木 哲也, 山際謙太, 山口篤志 (2012) フィラー形鋼心ワイヤロープの疲労損傷に及ぼす張力の影響, 日本機械学会M&M材料力学カンファレンス, 2012/09, 松山
5	国内外の研究集会発表	山際謙太, 本田 尚, 佐々木 哲也, 辻 裕一, 山口 篤 (2012) 素繊維複合材料ケーブルの疲労試験, 日本機械学会M&M材料力学カンファレンス, 2012/09, 松山
平成23年度(2011年)		
1	国内外の研究集会発表	本田 尚, 佐々木 哲也, 山際謙太, 山口篤志 (2011) 鋼心ワイヤロープの内部断線に及ぼす張力の影響, 安全工学シンポジウム, 2011/07, 東京
2	国内外の研究集会発表	本田 尚, 佐々木 哲也, 山際謙太, 山口篤志 (2011) 鋼心ワイヤロープの疲労特性に及ぼす張力の影響, 第44回安全工学研究発表会, 2011/12, 山形
3	国内外の研究集会発表	佐々木 哲也, 本田尚, 山際謙太 (2011) ワイヤグリップの取付基準の検討, 第44回安全工学研究発表会講演, 2011/12, 山形
4	国内外の研究集会発表	本田尚, 佐々木 哲也, 山際謙太, 山口篤志 (2011), 従来材およ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に関する研究, 一般社団法人日本クレーン協会ワイヤロープ委員会, 2012/01, 東京