

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 17 日現在

機関番号：82629

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24561007

研究課題名(和文)ワイヤロープの内部疲労損傷メカニズムの解明と寿命予測への応用

研究課題名(英文) Investigation on fatigue damage mechanism of wire ropes and its application to life prediction

研究代表者

佐々木 哲也 (SASAKI, Tetsuya)

独立行政法人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・上席研究員

研究者番号：60358413

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：ワイヤロープの疲労破壊はこれまで表面素線が先行すると考えられていたが、IWRCロープでは、内部の素線が先行する場合のあることが明らかになっている。そこで、本研究では各種IWRCロープについてS字曲げ疲労試験を行うとともに、ワイヤロープ素線のフレットング疲労試験を行った。その結果、フィラー形とウォリントンシール型ではどちらも内部の損傷が先行するが、その損傷形態には大きな違いがあることが明らかになった。またフレットング疲労には、素線に作用する繰返し引張荷重の大きさよりも素線同士の圧縮力の方が大きな影響を及ぼすことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In case of the fatigue failure of wire ropes, it used to be believed that outer element wires tend to be damaged before the inner element wires are damaged. However, recent investigation revealed that in case of IWRC ropes, the fatigue damage of inner element wires would precede than that of outer element wires. In this study, S-shaped fatigue tests were conducted using some types of IWRC wire ropes. Fretting fatigue tests using element wires were also carried out. These fatigue tests revealed that the filler type and the Warrington Seale type had different fatigue damage mode although the fatigue damage of the inner element wires preceded in both types. It was also revealed that compressive load between element wires had primary influence on fretting fatigue damage between element wires.

研究分野：構造信頼性工学、材料力学

キーワード：ワイヤロープ 疲労 内部損傷

1. 研究開始当初の背景

クレーン、エレベータ、資源開発などに使用されているワイヤロープが使用中に破断すると重大な災害となるため、ワイヤロープの寿命を適切に予測して破断前に交換することが災害防止のためには重要である。

一般に、ワイヤロープはシーブ(滑車)を介して往復運動するため、素線の繰返し曲げ応力による疲労、ロープとシーブの接触によるフレットング(摩耗)疲労、素線同士の接触によるフレットング(摩耗)疲労などが原因で破断することが知られている(その他の要因に腐食もあるが、割合としては疲労破壊が大部分である)。従来はこれらの疲労要因のうち、ロープとシーブの接触によるフレットング疲労が重視されており、国内外で種々の寿命予測式が提案されている。

一方、研究代表者らは事業場における労働災害の防止に関する調査研究を行っており、ワイヤロープの破断による災害においては、表面部の素線に異常がないのに、内部の素線で断線や摩耗が生じているワイヤロープも多数あり、特に IWRC (Independent Wire Rope Core、中心部が一般的な繊維心ではなく、鋼心になっているロープ)ロープでその傾向が強いことがこれまでの調査で明らかになった。また、ワイヤロープの検査は通常表面の検査に留まるため、このような内部損傷の場合は定期検査等での発見が遅れるため、結果としてワイヤロープの破断事故に至る可能性が高くなる。

以上のことから、ワイヤロープの破断による災害防止のためには、ワイヤロープの内部疲労損傷に着目して、ワイヤロープ全体の疲労寿命予測を行うことが効果的であると考えられる。

2. 研究の目的

ワイヤロープの疲労破壊はこれまで表面素線が先行すると考えられていたが、ロープ内部の素線が先行する場合のあることが明らかになっており、従来の表面素線の疲労破壊を対象とした疲労寿命予測法や非破壊検査法ではワイヤロープの破断による災害を十分に防止できていない。

そこで、本研究では内部素線の断線が先行することが指摘されている IWRC ワイヤロープについて種々の条件下でS字曲げ疲労試験を行い、断線位置を含む疲労損傷特性を明らかにする。また、ワイヤロープ素線単独でのフレットング疲労試験を行い、素線のフレットング疲労メカニズムを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究は、以下の2項目について研究を実施する。

(1)ワイヤロープ内部疲労損傷特性の解明

内部疲労損傷が発生しやすい IWRC ワイヤロープを使用し、 D/d (シーブ径 D とロープ

径 d の比)とロープ張力を変化させてS字曲げ疲労試験を行う。このワイヤロープ疲労試験に使用する試験機は研究代表者らが所属する研究機関で保有しているものであり、両端の駆動用シーブでワイヤロープを往復運動させ、中間のテスト用シーブでS字曲げを付与する。また、片側の駆動用シーブには油圧シリンダがついており、ワイヤロープに引張荷重を付与することが可能になっている。疲労試験の際には、あらかじめ設定しておいた往復サイクルで疲労試験機を中止し、テスト用シーブを往復していた部分のワイヤロープをほぐして内部の損傷状態(素線の破断状況と破断位置)を調べる。

(2)ワイヤロープ素線のフレットング疲労特性の解明

ワイヤロープ素線のフレットング疲労特性を明らかにするために、微小荷重試験機によりフレットング疲労試験を行う。具体的には、引張応力、摩耗用パッド押しつけ力とフレットング疲労寿命や摩耗量の関係を明らかにする。このフレットング疲労試験に使用する微小荷重試験機は電磁石によって加振するタイプ(最大荷重 250N)で、研究代表者らが所属する研究機関で保有しているが、現状ではフレットング疲労試験には対応していないので、素線に摩耗用パッドを押しつけるための治具を製作して使用する。この治具は図1のような機構で、ばねによってパッドを試験片(ロープ素線)に押しつける。パッド押しつけ力はねじによって調節可能とし、事前に校正して使用する。

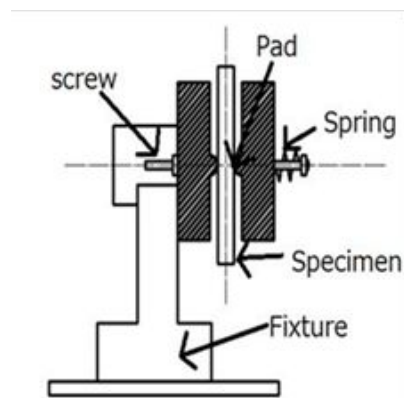


図1 素線フレットング疲労試験における圧縮力付与機構

4. 研究成果

(1)IWRC ワイヤロープの経年損傷特性

フィルター形 IWRC ワイヤロープ
フィルタ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。ワイヤロープの直径 $d=16\text{mm}$ で、 $D/d=16$ とした。

総断線数と繰返し数の関係を図2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グループに分かれ、両者には約2倍の寿命差がある。

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3に最大張力 $T = 34.6\text{kN}$ の場合について、可視断線が発生した時点の素線断線位置と断線数の関係を示す。他の張力についても同様の傾向を示しており、IWRC $6 \times \text{Fi}(29)$ では、いずれの張力も Bed 断線が最も多く、次いで Core 線、Inner 線の順であった。これらの断線はいずれも外観からは判別できない場所に位置している。

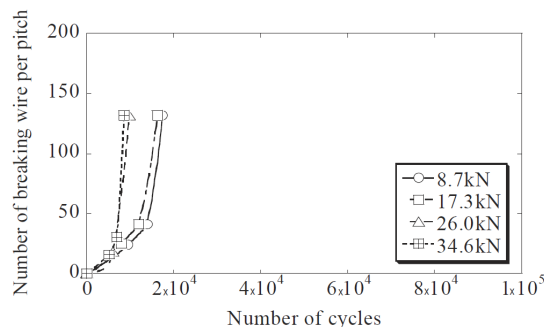


図2 フィラー形 IWRC ワイヤロープの総断線数と繰返し数の関係

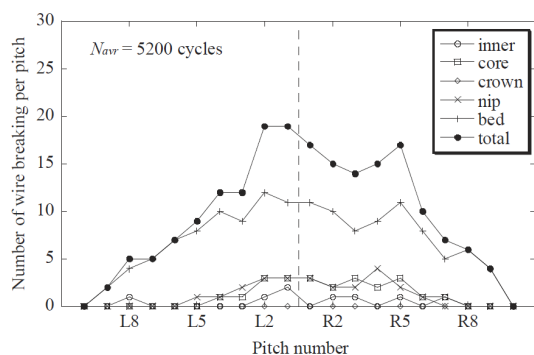


図3 フィラー形 IWRC ワイヤロープの可視断線が発生した時点の素線断線位置と断線数の関係 ($T = 34.6\text{kN}$)

ウォリントン・シール形 IWRC ワイヤロープ

フィラー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 $6 \times \text{WS}(31)$ 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。ワイヤロープの直径 $d = 16\text{mm}$ で、 $D/d = 16$ とした。

総断線数と繰返し数の関係を図4に示す。フィラー形と同様に、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 $T = 8.7\text{kN}$ では約 9×10^4 回と、最大張力 34.6kN の 1×10^4 回に比べて9倍に増加する。

次に、各張力における4%可視断線発生時の断線分布を調べた。図5に $T = 26.0\text{kN}$ と

$T = 34.6\text{kN}$ の場合の断線分布を示す。 $T = 8.7 \sim 26.0\text{kN}$ までは、総断線数に張力の影響はみられなかったが、最大張力 $T = 34.6\text{kN}$ のときは総断線数が極端に減少した。しかし、いずれの張力の場合も、断線数は鋼心と接する 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。フィラー形とは異なり、Inner 線はほとんど断線しないことが明らかになった。

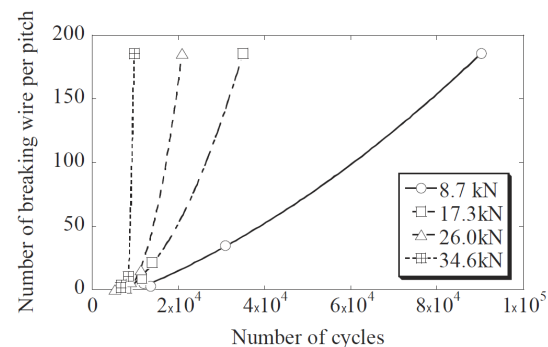
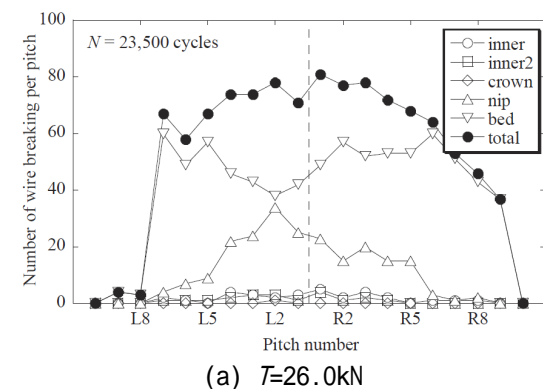
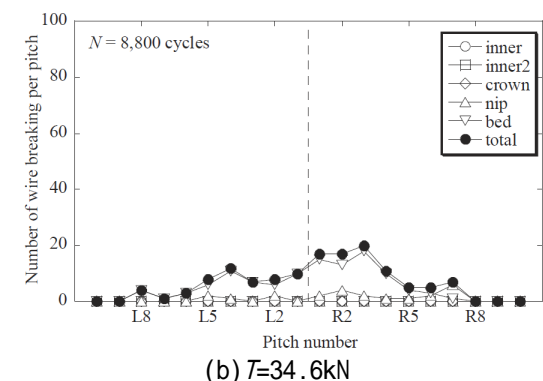


図4 ウォリントン・シール形 IWRC ワイヤロープの総断線数と繰返し数の関係



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



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

図5 ウォリントン・シール形 IWRC ワイヤロープの4%可視断線発生時の素線断線位置と断線数の関係

D/d の影響

前述の2種類のワイヤロープについて、シープ径とワイヤロープ径の比 D/d が疲労寿命に及ぼす影響を調査した。その結果、 D/d を

16 から 25 に大きくしたところ、ワイヤロープの種類に関係なく、疲労寿命が 3~10 倍増加した。また、 D/d を大きくすると、内部断線が先行し、外層素線の断線が遅延する傾向があることが明らかになった。

(2)ワイヤロープ素線のフレット疲労試験

パッド押しつけ力の影響

図 6 にフレット疲労試験によって摩耗した試験片の一例を示す。



図 6 摩耗した試験片の一例

図 7 はパッドによる圧縮力の大きさと最大摩耗深さの関係を 4 種類の荷重繰返し数 (1×10^4 、 1×10^5 、 5×10^5 、 1×10^6 ごとに示したものである。グラフから、同一荷重繰返し数に対してはパッドによる圧縮力が大きいほど最大摩耗深さが大きくなり、同一圧縮力に対しては荷重繰返し数が増加するほど最大摩耗深さが大きくなることわかる。

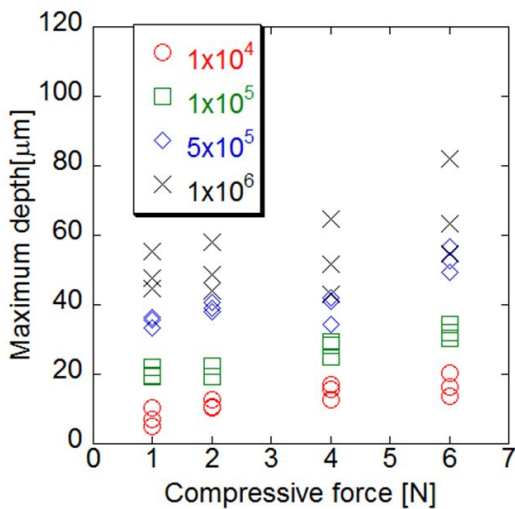


図 7 パッドによる圧縮力と最大摩耗深さの関係 (荷重繰返し数ごと)

繰返し荷重の大きさの影響

試験片に付与する正弦波状繰返し荷重の平均値を 33N、55N、99N(応力比 R は全て 0.1) の 3 種類に変化させたときの (荷重繰返し数 1×10^4 における) 最大摩耗深さを図 8 に示す。グラフから、パッドによる圧縮力が 1N の場合を除いて、繰返し荷重の大きさは最大摩耗深さに大きな影響を及ぼさないことが明らかになった。

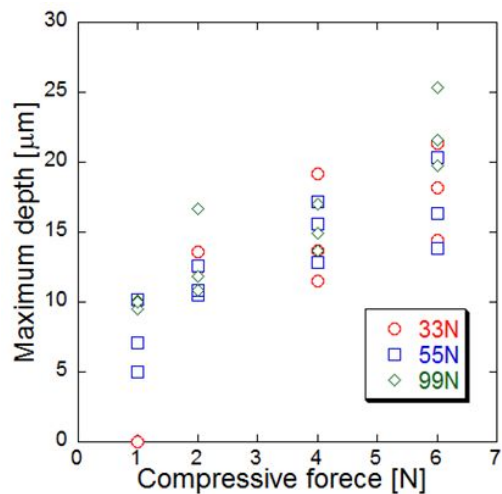


図 8 パッドによる圧縮力と最大摩耗深さの関係 (繰返し荷重の平均値ごと)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

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ワイヤ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、JNIOOSH-SRR、査読有、No.44、2014、pp.1-4

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 JNIOOSH-SRR、査読有、No.44、2014、pp.5-17

[学会発表](計 5 件)

本田 尚、佐々木哲也、山際謙太、山口篤志、大山裕太、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、安全工学研究発表会講演予稿集、Vol.46、2013、pp.195-198

本田 尚、佐々木哲也、山際謙太、山口篤志、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 M&M 材料力学カンファレンス、2013、(CD-ROM) GS24

本田 尚、佐々木哲也、山際謙太、山口篤志、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、pp.189-190

大山裕太、辻 裕一、本田 尚、佐々木哲也、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講演予稿集、2012、pp.226-227

本田 尚、佐々木哲也、山際謙太、山口篤志、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、(CD-ROM)GS09

6 . 研究組織

(1)研究代表者

佐々木 哲也 (SASAKI, Tetsuya)

独立行政法人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・上席研究員

研究者番号： 6 0 3 5 8 4 1 3

(2)研究分担者

本田 尚 (HONDA, Takashi)

独立行政法人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・上席研究員

研究者番号： 8 0 3 5 8 4 1 5

山口 篤志 (YAMAGUCHI, Atsushi)

独立行政法人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・研究員

研究者番号： 2 0 5 4 1 0 4 8