統計的手法に基づくワイヤロープの曲げ疲労寿命予測*

佐々木 康二*¹ 岩倉 昭太*¹, 高橋 龍彦*²
守谷 敏之*³ 古川 一平*³

Estimating Fatigue Life of Wire Rope with Stochastic Approach

Koji SASAKI*⁴, Shota IWAKURA, Tatsuhiko TAKAHASHI,
Toshiyuki MORIYA and Ippei FURUKAWA*⁴ Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd.,
502 Kandatsu, Tsuchiura, Ibaraki, 300-0013 Japan

We propose a new method of estimating the fatigue life of wire ropes of elevator. It is based on the assumption that the life of wire rope is determined by the fretting fatigue life of wires. Estimates done on a sample wire rope with the method were in good agreement with the experimental results. The method of estimation involves four steps. First, we did a finite element analysis and estimated the pressure between the wires. To take into account the behavior of the whole wire rope and each wire in the stress analysis, we did a zooming analysis. Second, we conducted a fretting fatigue test on the wires to construct a fretting fatigue database for them. Third, we estimated the life of each wire derived from the pressures between the wires and the fretting fatigue database. Last, we estimated the life of the wire ropes derived from the life of individual wires. The rope life estimated with our new method revealed some important findings. We found that: (1) the inner wires broke earlier than the outer wires and: (2) the residual strength of the wire ropes decreased rapidly after their strength became lower than 80% of their initial strength.

Key Words: Finite Element Method, Structural Analysis, Computational Mechanics, Zooming Analysis, Fretting, Fatigue, Life Prediction, Wire Rope, Elevator

1. 緒 言

エレベータ等の動索として使用されるワイヤロープ(以下、ロープと略称する)は、図 1 に示すように、エレベータの乗りかご及びカウンターウェイトによって張力を受けながら、シーブやプーリを通過する毎に繰返し曲げを受ける。このためロープを構成する素線はシーブやプーリとの接触により摩耗を受けながら繰返し曲げによって疲労破壊する。繊維を捻り合せた心に、複数の捻り線(ストランド)が捻り合せられた構造のロープを用いた場合、一般にはロープがシーブやプーリに接触する部分の素線が最初に摩耗し、疲労破断に至る^①ことから、ロープとシーブの間の摩耗による素線破断に着目した

種々の寿命予測実験式が提案されている^{②③}。しかし、シーブ材質が素線材質に比べ極端に軟質な場合や、繊維心ではなく IWRC(Independent Wire Rope Core: 独立したロープ心)を使用した場合などの条件下では、素線同士が擦れ合いながら曲げ応力を受けることによるフレTTING疲労破壊がロープ寿命を支配する事例が

Fig. 1 Schematic View of Elevator

* 原稿受付 2004 年 10 月 6 日。

*¹ 正員、(株)日立製作所機械研究所(☎ 300-0013 土浦市神立町 502)。*² 正員、(株)日立製作所水戸ビルシステム本部(☎ 312-8506 ひたちなか市毛 1070)。*³ 東京製鋼(株)技術本部研究所(☎ 300-0195 茨城県新治郡霞ヶ浦町栄倉 5707)。

E-mail: ksasaki@merl.hitachi.co.jp

Fig. 2 FE mesh for whole-model-analysis

Fig. 3 FE mesh for detailed-model-analysis

報告されている⁽⁴⁾。ロープのフレットングによる破断については多くの研究がなされており、フレットングに及ぼす諸因子の影響が明らかにされつつある⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし、フレットングによる素線断線をベースとし、素線強度のばらつきを考慮したロープの疲労寿命推定に関する研究は少ない。本報告では、有限要素法によって素線同士の接触荷重を推定し、別途作成

したフレットング寿命データベースと合せて素線毎の寿命を評価し、素線の強度ばらつきを考慮して統計的な処理を行うことにより、ロープのフレットング寿命を推定する方法について述べる。

2. 応力解析

2・1 全体解析によるロープ曲げ変形推定

ロープは鋼素線を数十本～数百本撚り合せた構造であり、通常の有限要素法によりモデル化すると解析メッシュ数が大きくなり、計算時間や記憶領域などの計算機資源が膨大になり実用上解析できなくなる問題がある。そこで本報告では、ロープを構成するストランドを簡略化した構造による全体解析と、特定のストランドを取り出して素線レベルまでモデル化した構造による詳細解析を組み合わせたズームング解析を実施した。

全体解析に用いた解析メッシュを図2に示す。全体解析においてはストランドの内部は均質な連続体でモデル化することにより解析規模を低減している。ストランドのヤング率は、ストランド単体の引張剛性の測定結果から80GPaとした。また、ロープとシーブの間には接触条件を設け、ロープに張力を与えながらシーブに沿って曲げている。ロープの変形は非常に大きく、微小変形の仮定が成立しないと推定されることから、大変形応力解析条件を設定している。応力解析にはHKS社製の陰解法静的応力解析ソフトABAQUS Ver.6.2を使用した。

2・2 詳細解析による素線間面圧推定

詳細解析に用いた解析メッシュを図3に示す。詳細解析では、1本のストランドのみを取り出して、素線レベルまで詳細にモデル化している。先に実施したロープの全体解析の結果からストランドの変形を取り出し、変位境界条件として詳細解析モデルに付与することで詳細解析を実施している。また、素線同士はロープ長手方向に自由に滑っているとの仮定に基づき、変位境界条件を付与する節点は、ストランドの両端部の節点と、それ以外のストランド中心部の節点とした。素線同士には全て接触条件を与えており、大変形条件での応力解析を実施している。素線間のすべりを良くするために素線には表面処理を施していることから、素線間の摩擦係数は小さいと考え、また、詳細解析結果から評価する素線間の接触面圧には、摩擦係数の影響が小さいと考えたことから、応力解析時の接触部の摩擦係数は0としている。接触面が非常に多いことから、詳細解析には収束性の高いLSTC社製の陽解法動的応力解析ソフトLS-DYNA Ver.9.6を使用した。

ズームング応力解析によって得られた素線同士の接触

Fig. 4 Results of zooming analysis

(a) Stress analysis (between parallel wires)

(b) Fretting fatigue test (between orthogonal wires)

Fig. 5 Calculation of contact force between wires

Fig. 6 Equivalent contact forces between orthogonal wires

による応力の分布図を、素線の変形図と合せて図4に示す。ロープが引張りと曲げを受けることによりロープは絞られながら曲げられ、結果として素線間に接触応力が発生していることが分かる。素線間の接触応力はストランドの中央付近ほど高くなっている。これは、ストランドが絞られることにより、内側の素線ほど高い押付け力を受けることが原因だと考えられる。

次章で作成する素線のフレットング寿命データベー

Fig. 7 Fretting fatigue test device

スと対比して素線の寿命予測を実施するために、ズーミング応力解析によって得られた素線同士の接触による応力を、直交素線の接触荷重に変換した。

図5に変換方法を示す。ここでは、応力解析で得られた平行素線間の接触による Hertz 応力⁹⁾と、フレットング試験で実施する直交素線の接触による Hertz 応力が等しいとした条件で接触荷重を求めている。この計算から得られた各層素線の接触荷重を図6に示す。同図より、第1層素線(δ1)の接触荷重が大きいことが分かる。このことから、δ1素線のフレットング寿命は他の素線に比べて短くなることが予想される。

3. フレットング疲労試験

3・1 試験方法

前章で実施したロープの応力解析で得られた素線同士の接触荷重及びワイヤロープ理論式により求められる素線曲げ応力⁹⁾から素線のフレットング疲労寿命を推定することを目的として、素線の断線寿命を求めるフレットング疲労試験を実施した。フレットング試験装置を図7に示す。フレットング試験装置は、加振機と押付け荷重を付与するコイルばねからなる加振機によって素線に負荷する変動張力とコイルばねによって負荷する押付け荷重はロードセルで計測した。素線同士が接触した状態で押付け荷重と繰返し引張荷重を付与した。素線の座屈を避けるため、素線の変動荷重は引張りの片振りとしている。押付け荷重及び応力振幅を複数条件に変化させて、

Fig. 8 Fretting fatigue life of wire

Fig. 9 Schematic View of Fatigue Test of Wire Rope

応力振幅、押付荷重と素線寿命の関係を測定した。

3・2 試験結果

フレット疲労試験によって得られた素線のフレット寿命と素線同士の接触荷重、応力振幅との関係を図8に示す。同図の縦軸は応力振幅を表し、横軸は疲労寿命を表す。また、奥行き方向軸は、素線同士の押付荷重を表す。押付荷重0となる一番奥側のグラフは、通常の素線の引張疲労試験によるS-N線図となる。同図より、以下のことが明らかになった。

- (1) いずれの押付荷重においても、応力振幅が大きくなるとフレット疲労寿命が小さくなる関係がある。
- (2) 同じ応力振幅に対しては、押付荷重が大きいほどフレット疲労寿命が小さくなる。
- (3) 押付荷重が大きくなるにつれてフレット疲労寿命への応力振幅の影響が小さくなり、いわゆる疲労限界が存在する。

以上より、素線同士の接触荷重及び応力振幅をパラメータとして、素線のフレット寿命が推定できることが分かった。この試験結果を素線のフレット強度データベースとし、次章で実施するロープの寿命予測を行った。

4. ロープの曲げ疲労寿命推定

ロープの応力解析結果及び素線のフレット疲労試験結果から、ロープの繰返し曲げに対する寿命を推定し、ロープの繰返し曲げ試験結果と比較した。ロープの繰返し曲げ試験方法を図9に示す。ロープはブレーキ

をつけたシーブ及びプーリを通り、両端を径の大きなシーブで巻き取っている。ロープに引張りを与えながら両端のシーブが往復回転することによってロープは移動しながらシーブ及びプーリを通過し、繰返し曲げを受ける。また、ロープにはブレーキ付のシーブを通じてトラクション（けん引力）も負荷される。

寿命推定の際は、以下の仮定を置いている。

- A) ロープの素線破断は、シーブの接触による摩耗や疲労ではなく、素線のフレット疲労によって生じる。
- B) 調質された金属の疲労強度(疲労限)が正規分布し、その標準偏差は8%である⁽¹⁰⁾ことから、ロープの各素線のフレット疲労強度(疲労限)も標準偏差8%の正規分布とする。
- C) 素線の初期の接触荷重、トラクションによる応力振幅及びロープ張力による素線の引張平均応力は有限要素法によるズームング応力解析によって求め、曲げ疲労試験中のこれらの値は素線が破断するにしたがってロープの残存断面積に反比例して増大する。
- D) 素線の破断によって変動するのは素線間の接触荷重、トラクションによる応力振幅及びロープ張力による素線の平均応力のみであり、その他の影響（断面崩れなど）は無視する。
- E) 素線の破断は全てロープの同一断面で発生し、素線の長手方向の強度ばらつきは無視する。
- F) 素線はフレット疲労寿命に達した時点で破断するものとし、それ以前に摩耗によって断面積が減少するなどの影響は無視する。

ロープ曲げ寿命推定アルゴリズムを図10に示す。アルゴリズムは以下の5つのステップからなる。

- I. ズームング応力解析により、ロープ曲げ疲労試験時の初期（ロープの素線に断線がない状態）の各素線の曲げ応力と接触荷重を求める。
- II. ロープ内の破断していない全ての素線のフレット余寿命 N_f を求める。余寿命は素線の曲げ応力 σ_b 、張力による引張応力 σ_t 、トラクションによる引張応力変動 σ_v 、素線間の接触荷重 f 及び式(4)で求めた累積損傷度 D (初期は0) からフレット寿命データベースを用いて求める。ここでB)の仮定により、各素線のフレット疲労強度は正規分布に則ったばらつきがあるとするとする。また、C)の仮定により、引張応力とトラクションによる引張応力変動、素線間接触荷重はロープの残存断面積に反比例して増大するとする。なお、ロープの曲げ時には素線に引張応力（平均応力）と曲げ応

力及びトラクションによる変動応力（応力振幅）が重畳しているため、修正 Goodman 線図⁽¹⁾により平均応力の影響を考慮している。

$$N_{fi} = (1 - D) \cdot N(\sigma_b, \sigma_t, \sigma_{tr}, f) \quad (1)$$

III. 全ての素線の中で最も早く破断するものを求め、寿命 N_f でその素線のみ破断したとして、健全な素線の断面積比からこの時点での残存強度 F を求める。

$$N_f = N_{f0} + N_{f \min} \quad (2)$$

$$F = F_0 \cdot \frac{A}{A_0} \quad (3)$$

ここで、 N_{f0} は一つ前の素線が破断した時の曲げ回数であり、 $N_{f \min}$ は式(1)で求めた N_{fi} のうちの最小値である。また、 F_0 はロープの初期強度、 A_0 はロープの初期の素線断面積合計、 A は破断した素線を除いた素線断面積合計である。

IV. 全ての未破断の素線について、Miner 則⁽¹⁾から疲労損傷度を求める。疲労損傷度はステップ III で破断した素線の寿命を、式(1)で求めたそれぞれの素線の寿命で割ったものの累積値となる。

$$D_i = D_{i0} + \frac{N_{f \min}}{N_{fi}} \quad (4)$$

ここで D_{i0} は 1 本前の素線が破断した時点での、各素線の累積損傷度を表す。

V. ステップ II に戻り、全ての素線が破断するまで繰り返す。

本手法によるロープ曲げ試験時の寿命推定結果を実験結果と合せて図 11 に示す。同図の横軸はロープの曲げ回数、縦軸は、初期を 100% とした時のロープの残存強度を表す。ロープの残存強度は、初期の 80% 程度まではゆるやかに低減し、それ以降は急激に全破断に至っている。ロープ残存強度が低下するにつれて、素線の引張応力、トラクションによる引張応力変動、素線間接触荷重が増大するためフレッティング寿命が低下することが原因である。比較のために実施したロープ繰返し曲げ試験では、ロープが全破断に至る前に試験を停止し、ロープを分解して内部の素線破断状況を調査し、健全な素線の残存状況からロープの残存強度を推定した。実験結果から得られたロープの残存強度は推定結果に比べてやや高いものの、推定結果は実験結果とよく一致し、本開発手法によってロープの寿命評価が可能であることが確認できた。推定結果が実験結果よりも残存強度が低い理由としては、素線間の接触面圧を素線種類毎に一定とし、素

Fig. 10 Problem Analysis Diagram (PAD) of wire rope life estimation

Fig. 11 Fatigue Life of Wire Rope

線毎に接触面圧の低いものがあることを無視していること、素線がすべて同一断面で破断するとして、ロープ長手方向の素線の強度ばらつきを無視していることなどが考えられる。

本手法によって推定したロープ素線の破断状況を図 12 に示す。同図の横軸はロープの曲げ回数を表し、縦軸は素線種類毎の破断素線比率を表す。図より、ストランドの第 1 層素線 $\delta 1$ の破断素線比率が早期に上昇していることが分かる。これは、 $\delta 1$ 素線が他の素線に先行して破断していることを表す。素線の破断は $\delta 1 \rightarrow \delta 0 \rightarrow \delta 4$ の順に進行し、他の素線は最終破断の直前までほとんど破断していない事がわかる。この推定結果と比較するために疲労試験後のロープを分解調査し、 $\delta 1$ 素線及び $\delta 0$ 素線が先行破断していることを確認した。 $\delta 1$ 素線及び $\delta 0$ 素線が先行して破断するのは、ブーミング応

Fig. 12 Ratio of broken wires of Wire Rope

力解析から明らかになったようにこれらの素線の接触荷重が高いことが原因である。

5. 結 言

ロープの曲げ時の応力状態を求めるズーミング応力解析手法、素線のフレットング強度測定手法と、これらを組み合わせてロープの曲げ疲労寿命を推定する手法を開発した。この手法はロープ素線のフレットング疲労寿命のばらつきを考慮して、正規分布のばらつきを仮定している。本手法をロープの寿命推定に適用し、以下の結論を得た。

- (1) ロープの使用時にストランド内部に発生する接触荷重は、内層素線の方が高くなる傾向がある。
- (2) ズーミング応力解析とフレットング強度データベースによる寿命推定結果は実験結果とよく一致し、本手法が有効であることを確認した。

- (3) ロープの繰返し曲げの際には、ストランドの内層素線が外層素線に先行して破断するという推定結果が得られ、実験結果と傾向が一致した。

文 献

- (1) 菊池正晃・矢野利行・中川俊明・海田勇一郎・栗原洋, ワイヤロープの摩耗と疲労による寿命の評価, 日本機械学会全国大会講演論文集 VOL. 71st Vol. B, pp.365-367 (1993)
- (2) 松田靖, 電気機器・材料の耐久性について IX エレベータ用ワイヤロープ, 電気設備学会誌 Vol. 5 No. 2 pp.65-70 (1985)
- (3) 本田武信, エレベータ用巻き上げロープの曲げ疲労特性, 資源・素材 Vol. 1988 No. M pp. 25-28 (1988)
- (4) T. W. Thorpe and Andrew Rance, AERE Harwell, The Tensile Fatigue of Wire Rope: A New Approach, Proc. Of Annual Offshore Technology Conference Vol. 15, No. 3, pp. 483-490 (1983)
- (5) 田中正清, 吊上げ用具類の新検査技術に関する研究 クレーン用ワイヤロープの疲労損傷を中心に 7 結論, 産業安全研究所特別研究報告 NIIS-SRR, No. 18 pp. 51-54 (1999)
- (6) Waterhouse R B, Fretting in Steel Ropes and Cables A Review, ASTM Special Technical Publication No. 1425 pp. 3-14 (2003)
- (7) 橋内良雄, S. Ganesh Sundara Raman, Muthuswamy Kanaraj, 吊上げ用具類の新検査技術に関する研究 クレーン用ワイヤロープの疲労損傷を中心に 5 ワイヤロープ用鋼及び SNC439 鋼のフレットング疲労挙動, 産業安全研究所特別研究報告 No. 18, pp. 35-43 (1999)
- (8) 日本機械学会編, 機械工学便覧 A4 材料力学, p109 (1984)
- (9) George A. Costello, Theory of Wire Rope, 2nd Edition, Springer (1997)
- (10) 日本材料学会編, 金属材料疲労設計便覧, p15 (1978)
- (11) 日本機械学会編, 機械工学便覧 A4 材料力学, pp121-122 (1984)