

Development of Life Prolongation Technology for Crane Wire Rope



横山 康雄
Yasuo Yokoyama
水島製鉄所 設備技術
部設備技術室 主査
(主席掛長)

要旨

巻上げワイヤロープ（以下、ワイヤ）の廃棄基準には法規で定められた素線切れや径の磨耗量などによる基準があるが、定量的な強度評価による判断基準ではないために、安全側に早めに取り替えを行う傾向があった。そこでニーマンの式による計算寿命と使用後のワイヤサンプルの残存強度との相関を見出し、この相関式による残存寿命判定技術を確立した。この技術を川崎製鉄のクレーンに適用したところ、ワイヤ寿命を1.6倍に延ばすことができた。また、この技術を活用し、レドールクレーンなどの高揚程クレーンでは本来ワイヤが持っている寿命よりも短寿命であることを発見するとともに、この問題を解消することのできる長寿命ワイヤを開発した。

Synopsis:

The standards for crane wire rope disposal are stipulated by law for determining the disposal by judging from the breakage of material wires and the reduction in diameter by abrasion of the wire rope. Since the standards, however, are not for the judgement for evaluating quantitative strength, wire ropes tended to have been prematurely replaced for safety sake. Under said circumstance, by studying the correlation between the calculated length of life span and the remaining strength of sample wire ropes after use, a technique of determining remaining life span by using the correlation equation has been established. When the technique was adapted to crane wire ropes at Kawasaki Steel, the span of usable life of wire ropes was extended 1.6 times than estimated before. Further, it was found through the technique that a wire rope for use in hoisting a ladle and so forth to high levels had shorter life span when compared with the life span the wire rope originally had, and on the basis of this finding, a wire rope having a long life and thus overcoming the above-mentioned problems has been developed.

1 緒 言

巻上げワイヤロープ（以下、ワイヤ）はクレーンにおいて最も重要な部品であるとともにその交換に多くの費用を費している。

従来、川崎製鉄におけるワイヤの寿命判定は、素線切れの有無を外観目視で確認するという一般的な方法であった。素線切れ検出機による方法や、使用後のワイヤの引張試験結果からの判定なども行っているが、特殊な場合に限られていた。従来の判定方法では多くの残存寿命を残しての交換となり、また、粉塵の多い環境で使用されたワイヤは素線切れが発見しづらく、切断の危険性もあった。この対策として、独自の定量的なワイヤ寿命判定方法を開発し、川崎製鉄のクレーンに適用したところ、ワイヤ寿命を約1.6倍に延長できた。さらに、この技術を活用しレドールクレーンなどの高揚程クレーンにおける特殊な寿命低下要因を解明するとともに、この要因を解消する長寿命ワイヤを開発した。本報では、これらの開発経緯と内容について述べる。

2 従来の寿命判定方法と問題点

Fig. 1 に川崎製鉄における一般的なワイヤの使用状況を示す。ワ

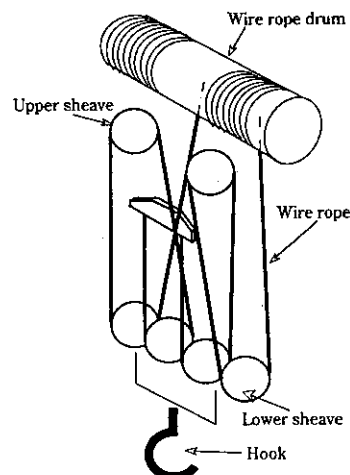


Fig. 1 Operation condition of crane wire rope

* 平成12年11月1日原稿受付

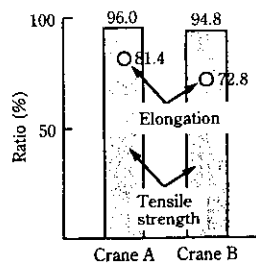


Fig. 2 Strength of used wire

ワイヤ寿命は、シーブを通過する時の繰返し曲げによる疲労寿命で決まる。ワイヤはJIS 13号または18号の6×Fi(29)を使用している。従来のワイヤ取り替えは、過去の素線切れ経験から設定された期間での定期交換、もしくは、点検によって素線切れを発見した時点で取り替える方法であった。取り外したワイヤには数本の素線切れはあったがその他の磨耗などの損傷は軽微であり、とても使用限界に達したとは考えられない状態であった。また、使用後のワイヤの強度を測定した結果、Fig. 2に示すようにわずかの低下しか認められなかった。定期取替されたワイヤについては、通常、残存強度などの調査は行われていないため、Fig. 2に示す値の良否を判断するすべがなかった。そこで、ワイヤ寿命をより定量的に評価でき、適切な取替時期が判断できる手法の開発が、ワイヤの寿命を使い切ること、ひいてはメンテナンスコストの低減に繋がるものである。

3 ワイヤ寿命計算式

ワイヤの曲げ疲労寿命に関する式は従来、各種の推定式が提言されている。¹²⁾ そこで、これらの推定式と実機で過去に起こった破断寸前状態となった実績とを比較した。その結果をFig. 3に示す。いくつかの実績に対し、同じ式でも近似するものと大差がつくものがあるが、安全側で比較のパラツキの少ないものが式(1)に示すニーマンによる式であることを見出した。³⁾

$$N = 170\,000 \times \left(a \times b \times \frac{D - \frac{9}{d}}{\sigma + 4} \right)^2 \dots\dots\dots (1)$$

N: Number of bending at rope breakage

a: Coefficient of sheave shape

b: Coefficient of construction

D: Sheave diameter

d: Rope diameter

σ: Stress of rope

ところが、ニーマン式の場合、ロープ構成が6×37であり、現在使用しているフィラータイプとは異なる。ワイヤメーカーなどからもロープ構成による係数bの値が提唱されているが、さらに推定精度を高めるため、実機での使用後のワイヤサンプル分析結果から、より高精度な寿命推定を可能にする係数bの値を求めた。その結果をTable 1に示す。また、この係数を用いて計算した場合の実績との比較をFig. 3に示す。ただし、Table 1の値は、川崎製鉄の設備・使用条件・環境に合わせた値であるため、他社のクレーンにおいて適用可能かは詳細な検討を行なう必要がある。

4 ワイヤの残存強度

素線切れが発生し交換したワイヤの残存強度を調査し、3章で求

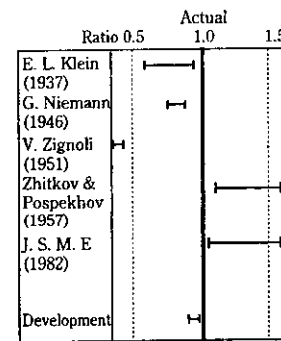


Fig. 3 Comparison between actual rope breakage and calculation

Table 1 Coefficient of construction, b

	Ladle crane	Other crane
Round wire 6×Fi(29)	0.9	1.1
Profile wire 6×Fi(29)	1.0	1.4

められる寿命との相関の有無について各種の分析を行った。ワイヤサンプルは新品同様であるドラム捨て巻部とシーブを最も多く通過した部分の2本を採取し、劣化部のデータを新品部のデータで割った残存強度比率で表わすようにした。強度指標としてはロープ径、ワイヤ径、素線引張強度、素線ねじり強度を選定した。さらに、各ワイヤの使用期間を一律に比較できるようにするため、実際の曲げ回数または使用日数を計算で求めた破断日数で割った残存寿命比率で表すようにした。

各種強度指標と残存寿命との関係をFig. 4～7に示すが、ねじり試験以外では残存寿命との相関が顕著ではなく精度の高い判定は不可能であり、一方素線のねじり試験結果において、残存寿命との明確な相関があることを解明した。

そこで、このねじり試験結果と寿命との回帰式を求め、新たに寿命判定を行なう場合にはニーマン式による寿命計算をすることなく、使用後のワイヤ素線のねじり試験結果から残存寿命を即座に計算できるようにした。³⁾ その結果、従来の判定方法では50%前後の残存寿命で取り替えられていたものが、ばらつきを考慮して使用限界を残存寿命20%までとし、取り替え時期を限界まで延ばすことができるようになった。同時に、本法の高精度かつ定量的な劣化判定によりワイヤ切断事故を防止することも可能になった。(Fig. 8)

5 レードルクレーン用ワイヤの長寿命化

製鋼工場におけるレードルクレーンは、高荷重かつ高揚程という過酷な条件であるため使用されるワイヤロープに対しても、高い品質が要求される。また、大径かつ長尺ワイヤであるため、取り替えには高額な費用が掛かっている。このため、レードルクレーンのワイヤの長寿命化は長年の課題であったが、吊り荷が高温溶融物であり、かつ重要生産設備であることから容易には実現できなかった。今回、この問題を一举に解決し寿命を飛躍的に向上させる長寿命ワイフロープの開発を行ったので、その内容を以下に示す。

5.1 異形線ワイヤの実機適用拡大

異形線ワイヤは従来から高強度ワイヤとして製造されていたが、

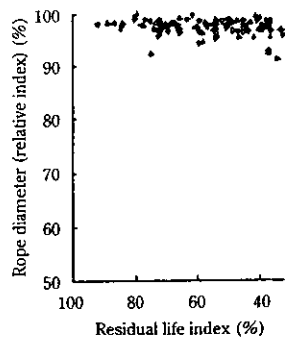


Fig. 4 Relationship between rope diameter and residual life

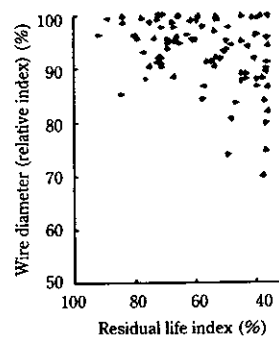


Fig. 5 Relationship between wire diameter and residual life

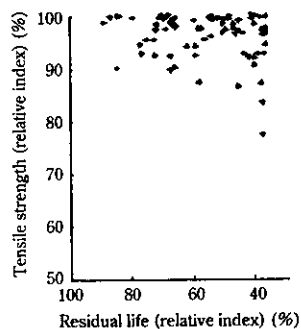


Fig. 6 Relationship between tensile strength and residual life

天井クレーンやレードルクレーンなどのシーブによる曲げを多く受ける設備へは不向きとされてきた。異形線の特性を把握すべく実験にて使用したところ、短期間で型崩れを起こすなどの構造上の問題が頻発した。しかし、テストを繰り返しながら製造条件の改良を加えた結果、従来比 1.6 倍以上の長寿命性を安定して確保できるようになった。現在、川崎製鉄の約 30% のクレーンに適用拡大し、大きな成果を発揮している。(Fig. 9)

5.2 非自転異形線ワイヤの開発

5.2.1 従来のワイヤ寿命と問題点

一般の天井クレーンとレードルクレーンとの使用後のワイヤサンプルを比較したところ約50%の使用率と同等の使用割合にもかかわらず、レードルクレーンの方がねじり強度の低下率が大きいことが判明した。Table 2 に比較結果を示す。対象はレードルクレーン 9 台、一般クレーン 43 台での平均値データで示している。

表からも明らかなように、両者が大きく異なるのは揚程である。そこで、同種類・同径のワイヤロープを使用し、揚程の異なる 2 台

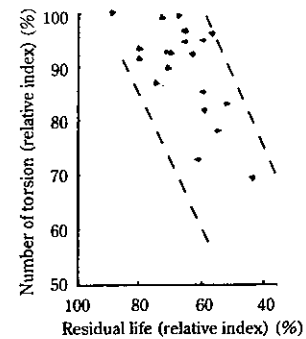


Fig. 7 Relationship between number of torsion and residual life

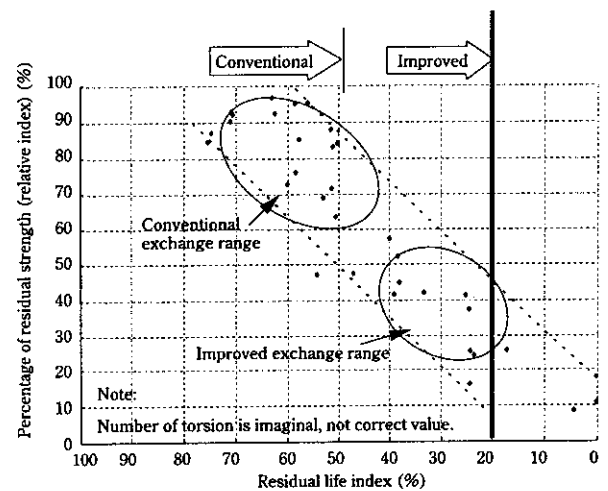


Fig. 8 Test result of wire rope strength

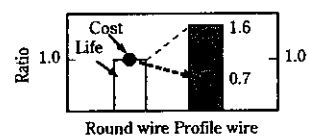


Fig. 9 Comparison between round wire and profile wire

Table 2 Comparison between ladle crane and other crane

	Ladle crane	Other crane
Ratio of life $\frac{\text{Actual life}}{\text{Calculated life}} \times 100 (\%)$	53.4	49.5
Ratio of torsion $\frac{\text{Used rope}}{\text{New rope}} \times 100 (\%)$	48.5	63.5
Lift (m)	22.7	9.2
Stress (kN/mm ²)	147.0	159.7
D/d	26.9	25.4

のクレーンにてワイヤの自転状態を比較観察してみた。その結果を Fig. 10 に示す。レードルクレーンは高揚程でありワイヤドラムからの繰り出し長さが長い為、ワイヤは自転し 180° 反転する。すなわち、シーブでの曲げ状態が U 字曲げから S 字曲げに変化していることになる。この現象に起因して、本来の寿命よりも短期間で劣化が進行していることが推定された。

Table 3 Influence of wire rope life caused by rotation

	Round wire		Profile wire	
	Crane A 180° rotation	Crane B A few rotation	Crane A 180° rotation	Crane B A few rotation
×1 000 times* ¹	93.1	142.1	128.8	252.7
Ratio	1.0	1.53	1.0	1.96

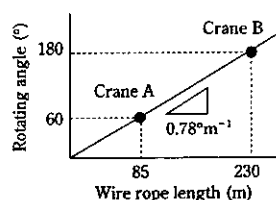
*¹ Number of bending at 10% wire breakage

Fig. 10 Rotating angle of ladle crane

自転の有無による寿命延長効果を Table 3 に示す。これは、従来ワイヤを使用し、同じ荷重条件下で揚程のみ異なるクレーンにおける寿命を比較したもので、B 機は低揚程のため自転角度が小さく、ほぼ非自転と同等の状態にある。自転をなくすことによる寿命延長効果は明白であり、さらに異形線の方がより大きな効果が得られることが分かった。自転を防止するには非自転性ロープを使用すればよいが、曲げ疲労性に優れ、かつ、コスト増にならない非自転性ロープでなければならないため、独自に開発することにした。

5.2.2 開発ポイント

開発の狙いは非自転性・耐曲げ疲労性・内部素線応力緩和であり、これらを実現させるために以下の最適化を行った。⁹⁾

(1) 非自転性

側ストランドと芯綱の捻り方向を逆転させ、ロープ・ストランド・芯綱の各ピッチを最適化した。

(2) 耐曲げ疲労性

芯綱の構成をシールタイプ S (19) とし柔軟性を向上させた。

Table 4 Test result of developed rope

	Conventional rope	Developed rope
Construction	IWRC 6 × Fi (29) 0/0 grade B	8 × P · Fi (29) + 7 × S (19) 0/0 grade B
Rope diameter (mm)	35.5	35.5
Breaking load (kN)	1 000~1 065	1 019
Elongation (%)	2.0~5.0	6.3
Rotating coefficient	0.09	0.04
Endurance test* ²	114.0 × 1 000 times	137.0 × 1 000 times

*² Number of bending at 10% wire breakage.The load is 17% of the breaking load and D/d is 20.

(3) 素線応力緩和

8 ストランド化および側ストランド・芯綱ともに異形線化し、シーブとの接触応力及び素線同志の接触応力を緩和させた。

5.2.3 開発ワイヤロープの性能

Table 4 に開発したワイヤロープの試験結果を示す。

Fig. 11 に従来ワイヤと開発ワイヤの断面を比較して示す。

Fig. 12 は開発ワイヤの非自転性のテスト結果を示すが、大幅な非自転性の改善がなされ、非自転ロープである 18 × 7 に匹敵するほどの性能を有していることがわかる。^{4,9)}

素線同志およびシーブの接触部の応力低減のために素線形状を異形線にした結果、ロープ曲げ応力および素線の最大接触圧力において、計算値ではあるが大幅な低減効果が得られた。その結果を Table 5 に示す。IWRC 6 × Fi (29) での接触圧力は 4 391 kN/mm² と高い結果となったが、実際は塑性変形を起こし発生圧力 1 764 kN/mm² を越えない。この時の比率を () 内に示した。

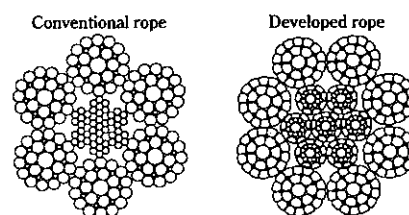


Fig. 11 Cross section

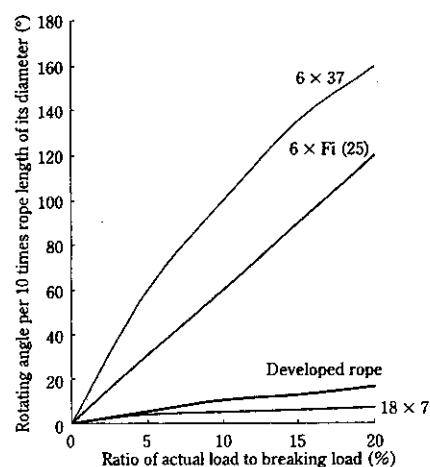


Fig. 12 Comparison of non-rotating rope

Table 5 Contact pressure^{6,7)}

	IWRC 6 × Fi (29)	IWRC 6 × P · Fi (29)	IWRC 8 × P · Fi (29) (Developed rope)
Contact pressure (kN/mm ²)	4 391 (1 764)	1 741	1 672
Ratio	1.0	0.40 (0.99)	0.38 (0.95)

Table 6 Moment of inertia of area

	IWRC 6 × Fi (29)	IWRC 6 × P · Fi (29)	IWRC 8 × P · Fi (29) (Developed rope)
Moment of inertia of area (cm ⁴)	4.46	5.23	5.99
Ratio	1.0	1.17	1.34

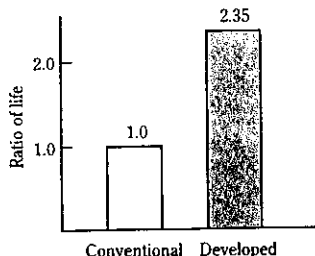


Fig. 13 Effect of life prolongation

さらに、シーブにより曲げを受けたときの発生応力は、ワイヤ断面性能により変化する。Table 6 に断面性能を比較を示す。ただし、ワイヤは素線・ストランドともにスパイラル状によられており、曲げられた時には複雑な滑りや形状変化を伴うため、真の値を求めることは避け、2次断面による拘束条件での相対評価とした。

5.2.4 寿命延長効果

開発ワイヤを実機レードルクレーンで使用した結果、従来比 2.35 倍の長寿命性が確認できた。(Fig. 13) これは非自動性によりシーブ通過時の逆曲げ現象が解消され、8 ストランド化および形状改善

によりシーブとの接触部での応力緩和および内部素線同士の接触部での応力緩和が計画通り達成されたことによると考える。

6 結 言

製鉄所におけるクレーン設備管理の最も重要な使命は、事故や故障を起こさないこととともに、いかに底コストで設備を維持するかということ両立させる点にある。このような観点から、ワイヤロープの寿命判定、長寿命化の検討を行い以下の結果を得た。

- (1) 実機データをもとにニーマンの式を修正し高精度の寿命予測式を提案した。
- (2) ワイヤの残存寿命判定にはねじり試験が適していることを見い出すとともに、これによる判定式を作成した。
- (3) レードルクレーンワイヤの寿命が、ワイヤの自転により短くなっていることを究明し、自転を防止したワイヤにより 2 倍以上の寿命延長を達成した。

最後に、今回の長寿命ワイヤの開発に際し、多大なご支援をいただきました高麗製鋼(株)殿をはじめ、関係各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 日本機械学会: クレーン用ロープ及びロープ車などの寿命調査研究分科会成果報告書, (1983)
- 2) ワイヤロープハンドブック編集委員会: 「ワイヤロープハンドブック」, (1995), [日刊工業新聞社]
- 3) 相羽幸男: 「ワイヤロープ」, (1995)
- 4) 会田俊夫, 佐藤 進, 中井幹雄, 川端陽史: 「複撚り鋼索の自動性能について」, 第 1, 2 報, 機械学会講演論文集, 173
- 5) 会田俊夫, 佐藤 進, 中井幹雄, 他: 「複撚り鋼索の自動性能について」, 第 1, 2 報, 機械学会前刷集, 144, 152
- 6) 会田俊夫, 佐藤 進, 中井幹雄: 「鋳鉄ローラ上の鋼索の曲げ応力および接触圧力について」, 材料, 12(1963)122, 788~793
- 7) 会田俊夫, 佐藤 進, 中井幹雄: 「ランニングされたローラ上の鋼索の曲げ応力および接触圧力」, 材料, 12(1963)122, 794~799
- 8) 川崎製鉄(株): 特開平 09-178611
- 9) 川崎製鉄(株): 特願平 241663