

2. クレーン用ワイヤロープの破断事故調査例と問題点

田中正清*

2. Analysis of Fracture Accidents of Crane Wire Ropes and the Problem Included

by Masazumi TANAKA*

Abstract: Wire ropes are widely used for cranes, for example, on the lifting and derricking work, under the condition of heavy duty in many cases. And recently in Japan, considerable number of serious crane accidents happened, caused by the fracture of wire ropes.

In this report, three crane accident cases which resulted in one or more casualties (death) were reviewed first, then the characteristics of rope failure were defined, and the problem of the present situation relating to the safety aspects were clarified from the accident analysis and other references.

As to the first case, the derricking wire rope of a 60 ton crane suddenly broke when steel material were being hoisted in a building construction site. The result of the precise studies including spot investigation, analysis of the state of wire rope failure, the strength of the rope and the fractographic analysis of the feature of the fractured surfaces of wires showed that the direct cause of this accident was the remarkable decrease of rope strength due to internal wear and the following fatigue failure of wires. However, the essential causes seemed to be that the damage had proceeded preferentially at internal portion, and therefore, it was very difficult to detect it.

As to the second case, similarly the derricking wire rope of a 50 ton crawler crane suddenly fractured when four H-section steels were hoisted in the pier construction site. From the similar precise analysis as mentioned above, it was supposed that the main cause of this accident was also the remarkable decrease of rope strength to about one-tenth of that in the original normal state, and that although such heavy state of damage was due to the improper maintenance or management, the role of the internal failure was essentially important as it was in the first case.

As to the third case, the main hoisting wire rope of 150 ton crawler crane broke when a 44 ton concrete block was being hoisted at a sea wall construction site. It was concluded that the cause was the drastic decrease of rope strength due to the severe abrasion on the surface and the remarkable corrosion especially in the internal portion of the rope, maybe with such damage caused by improper maintenance inspection.

From the analysis of this kind of accidents including ones in other references, it was supposed that the IWRC (internal wire rope core) wire rope commonly had a characteristic of preferential internal failure when it was used as a travelling wire rope. As the crane users and even inspectors practically can not detect the damage of this type correctly by means of the external observation which is common in Japan, the present situation would be serious from the safety point of view if the above mentioned supposition were true.

This supposition will be confirmed in the next Chapter.

Keywords; Crane, Wire rope, Fracture accident, Wire breaking, Internal damage, Inspection, Abrasion, Corrosion

1. はじめに

我が国では広範な産業活動の場で、おびただしい数のクレーンが使用されており、これらにおいては、ジブの支持および起伏用、荷の巻き上げ用、さらには玉掛け用として、各種のワイヤロープが張力を支える主要強度部材として大量に使用されている。ところが、このようなワイヤロープの破断によるクレーン関係の災害が、いろいろな形をとりながら、毎年かなりの件数発生しているのが現状である。

労働省における重点施策である労働災害防止計画の中でも、重点対象分野として建設業や陸上貨物事業が挙げられているが、これらの業種における災害の減少のためには墜落やクレーンの転倒の防止のほかに、このワイヤロープの破断災害の防止も非常に重要な課題となっている。

ところで、当研究所では、昭和末から平成初期の数年にかけて発生したワイヤロープの破断による災害の主な事例について、直接原因調査を担当する機会があった。その調査によれば、いろいろなタイプの従来型の原因による事例もみられたが、最近の事例の多くには、ロープ内部での損傷を伴うという注目すべき特徴が認められた。

本特別研究では、結局この内部損傷の発生特性についての系統的な実験的検討を実施することとしたが、本章では、そのきっかけとなったワイヤロープ破断事故例の中から、代表的な三つの事例についてその概要を報告すると共に、それらを含む最近の事故調査および参考資料から明らかとなってきた問題点を指摘した。

2. クレーン用ワイヤロープの破断事故調査例

2.1 事例1: 60t クローラークレーンのジブ起伏ワイヤロープの破断^{1~3)}

(イ) 事故の概要

平成元年、建設現場で、60t クローラークレーンによって鉄材（重さ約 0.8t）を吊り上げていたところ、突然ジブ起伏ワイヤロープが破断し、ジブが鉄材と共に落下し、近くに居た作業者が補助ジブにはね飛ばされて即死した。Fig. 1 事故の発生状況である。

(ロ) 破断したワイヤロープ

破断した起伏ロープは Fig. 2 に示すような、鋼心入りのワイヤロープで、その構成は IWRC 6×Fi(29)、公

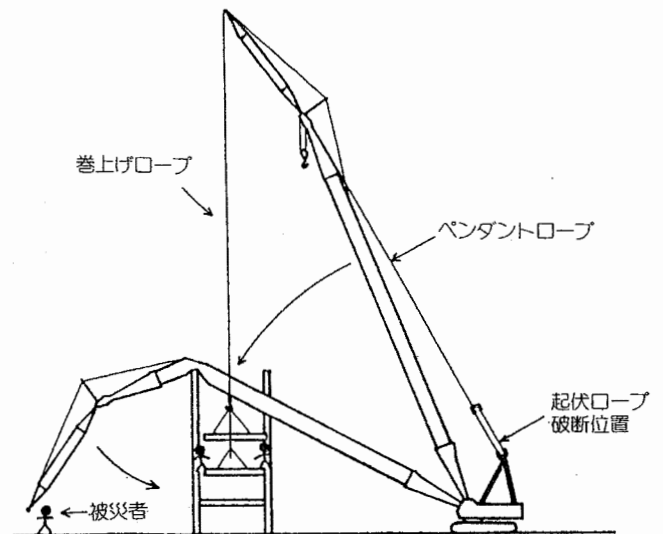


Fig. 1 The general situation of fracture accident of derricking wire rope
クローラークレーンのジブ起伏ワイヤロープ破断事故の発生状況

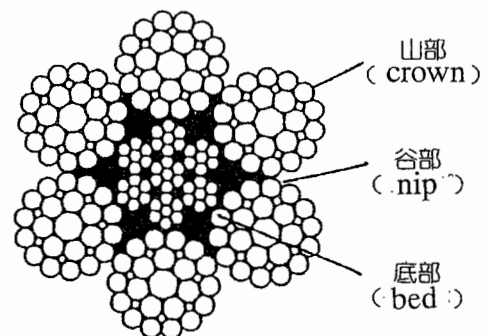


Fig. 2 Construction of the fractured wire rope of the IWRC6 × Fi(29)
事故で破断したワイヤロープの断面構成

称径は 16 mm、公称破断荷重は 188.3 kN (19.2t) であり、Fig. 3 に示すように 12 本掛けで使用されていた。シーブに巻き付けたワイヤロープの中心の描く円（ピッチ円）の直径 D とワイヤロープの直径 d の比 D/d は 16 である。ロープ破断事故は同図中に示す位置において更新後 11ヶ月で生じた。

(ハ) ロープの破断損傷状態

ロープの破断部は素線のほぐれが非常に少なく、損傷によってこの部分の強度が著しく低下していたことを推測させる。その損傷部ではストランドと心ロープの接触位置で双方の素線の押しつけによる断面変形と著しい摩耗が生じ、伸び（くびれ）の少ない横断面型

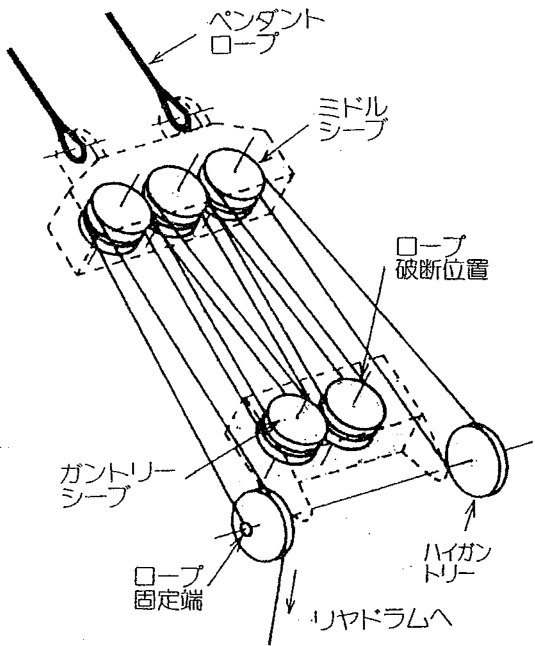


Fig. 3 The path of derricking wire rope and fracture
起伏ワイヤロープの掛け方と破断位置

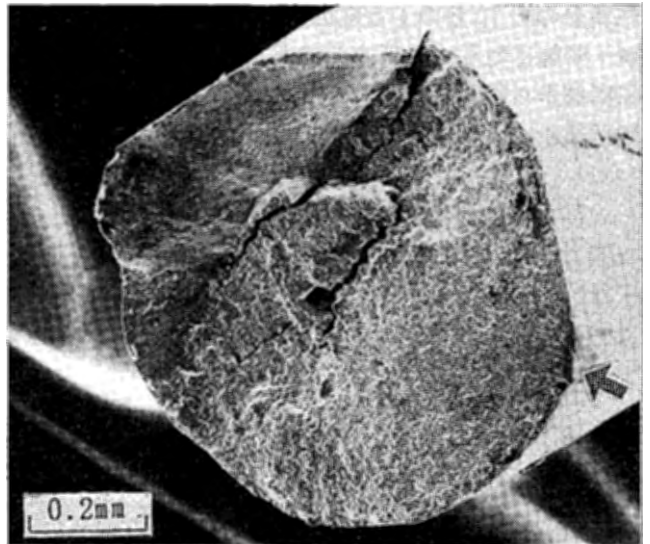


Fig. 5 Typical example of wire breaking of cross-section type
横断面型の素線断線の典型例
(ストランド外層素線, 矢印は疲労き裂発起点)

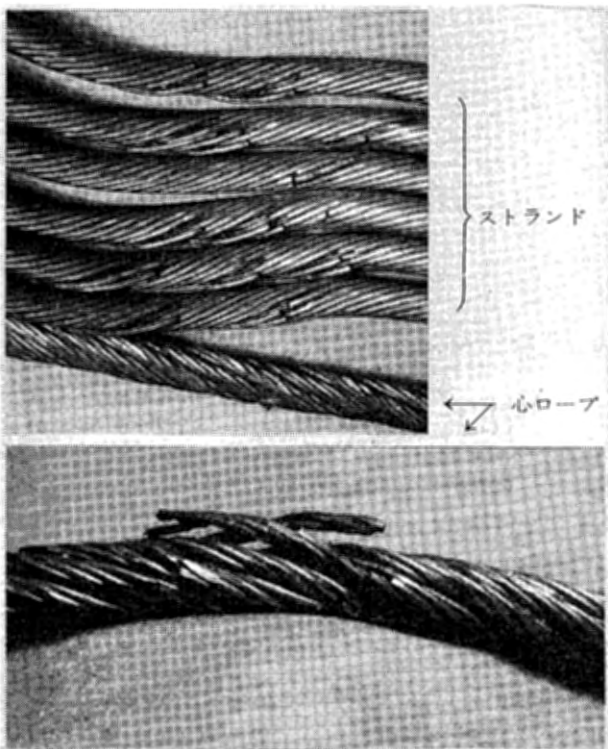


Fig. 4 The feature of wire breakings inside the rope near the fractured portion
破断部近傍でのワイヤロープの内部での顕著な断線損傷の状態

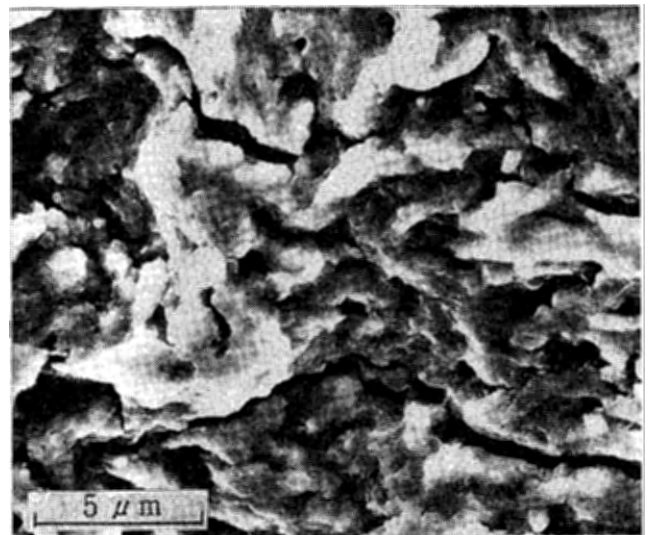


Fig. 6 A microfractograph of the fractured surface of cross-section type wire breaking
横断面型素線断線の破断面の微視的形態
(疲労破壊の特徴)

で破断した素線が多い。Fig. 4にはこの種の内部断線損傷の例を示す。また Fig. 5は横断面型素線断線の典型例である。

心ロープのほとんど全ての外層素線、さらには変形、摩耗はすくないがストランドの全ての心線と大部分の内層素線はこの横断面型で破断していた。

走査電子顕微鏡による観察の結果、Fig. 6に示すように、上記の横断面型の断線は、いずれも荷重の変動やシーブ通過時の繰返し曲げによって素線に疲労き裂が形成され、それが拡大して生じたものと判明した。

(二) 事故時のロープ強度

事故時にロープ強度に貢献できたのはこの型の断線を除くストランド内層の約3分の1だけで、ロープ強

は新品の約 10 分の 1 と推定された。著しい内部での摩擦・断線に対し、外部摩擦は軽微であった。ちなみに、破断部から約 1.5m の位置での 1 ロープピッチ内の外部断線数と内部断線数の比は 1 : 4 であった。

(木) 結論

本件の事故原因は直接には内部摩擦とそれに続く金属疲労損傷による起伏ワイヤロープ強度の著しい低下である。しかし、その状況を招いた根本的原因はその損傷が内部で先行していたため発見が困難であったことであると判断される。

2.2 事例 II : 50t クローラークレーンのジブ起伏ワイヤロープの破断^{4,5)}

(イ) 事故の概要

平成 4 年、河川敷における橋脚建設工事現場において全油圧式 50t クローラークレーンの補巻きフックを用いて H 型鋼 4 本の移動吊り降ろし作業を行っていたところ、ジブ起伏ワイヤロープが破断してジブが倒壊し、ジブ先端シーブが、地上で同クレーンの誘導を行っていた作業員の頭部を直撃し即死させた。Fig. 7 は事故時の負荷状態および主要寸法関係を示す。

(ロ) 破断したワイヤロープ

破断した起伏ワイヤロープは事例 I と同じ IWRC 6×Fi (29) の構成で、公称径は 14 mm、公称破断荷重は 157 kN (14.2 tf) である。

(ハ) ロープの破断損傷状態

本件ワイヤロープの固定側破断部では素線のほぐれが非常に少なく、両破断端の突き合わせによると、破断部で約 60 cm にわたり 5 本のストランドと心ロープが脱落した激しい損傷状態で、強度も大幅に低下していたと推定された。

素線にはワイヤロープ破断部を中心に顕著な摩擦が生じており、破断部近傍ではそれが原因で素線断線が生じている。またそこからドラム側では異常に粗い表面状態の激しい摩擦も観察された。摩擦の位置をワイヤロープ断面で見ると、ドラム側では山部 (crown) が最も顕著で、次いで谷部 (nip)、さらに底部 (bed) の順になっている。心ロープの素線もかなり摩擦しているがストランドの内層素線および心素線の摩擦は軽微である。

一方、固定側では山部より谷部および底部での内部摩擦が顕著であった。しかし、ワイヤロープ直径の減少率はいずれの箇所でも移動式クレーン構造規格で決められた廃棄基準 7%には達していない。

固定側、ドラム側いずれのワイヤロープにも Fig. 8 に示すように顕著な摩擦を伴うストランド素線断線の集中した部分 (以下局部損傷部) が 15 箇所ほど観察されたので、それらの部分を中心にワイヤロープ 1 ピッチを切り出し

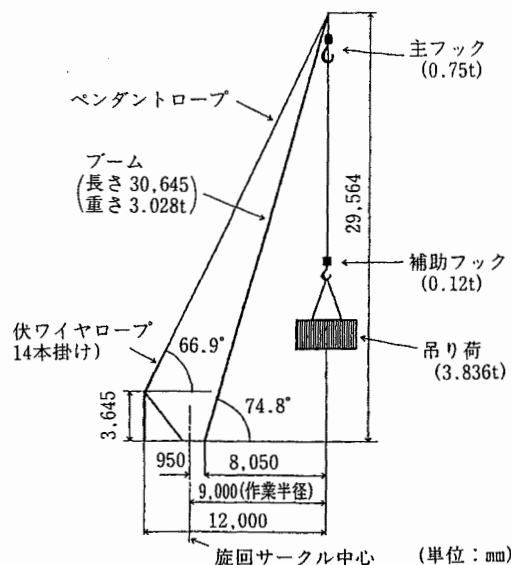


Fig. 7 Loading condition and dimensions of the accident crane
事故時のクレーンの負荷状態と寸法

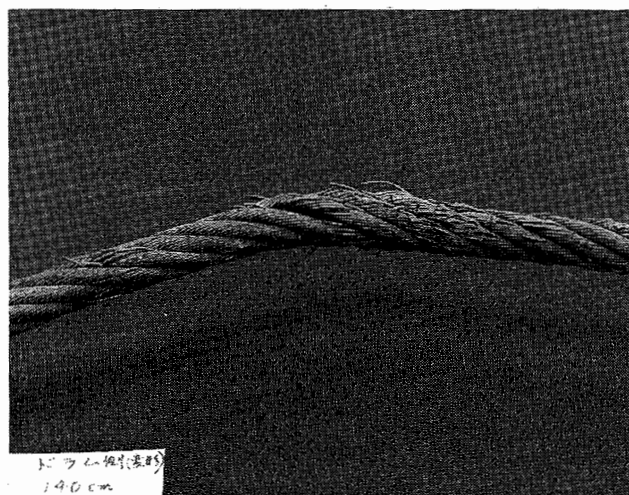


Fig. 8 Locally formed damage including remarkable wire breakings
局部的に形成された顕著な損傷

て素線まで分解し内部を含めた全体的損傷状態を調べた。Fig. 9 にはその調査による素線断線の分布状態を示している。

位置別には、ワイヤロープ破断部からドラム側 1 ないし 2m 当たりの山部での外部断線が最も顕著である。しかし、実際に破断した位置では、外部断線は最大値よりやや少なく、代わって内部断線 (ストランドの外層素線の谷部、底部、第 2 層素線のおよび心素線さらに心ロープ素線) がほぼ同程度に生じており、総断線数はやはり破断位置で最大である。いずれにしても、この損傷状態は廃棄基準「素線数の 10%以上」を大きく超えている。

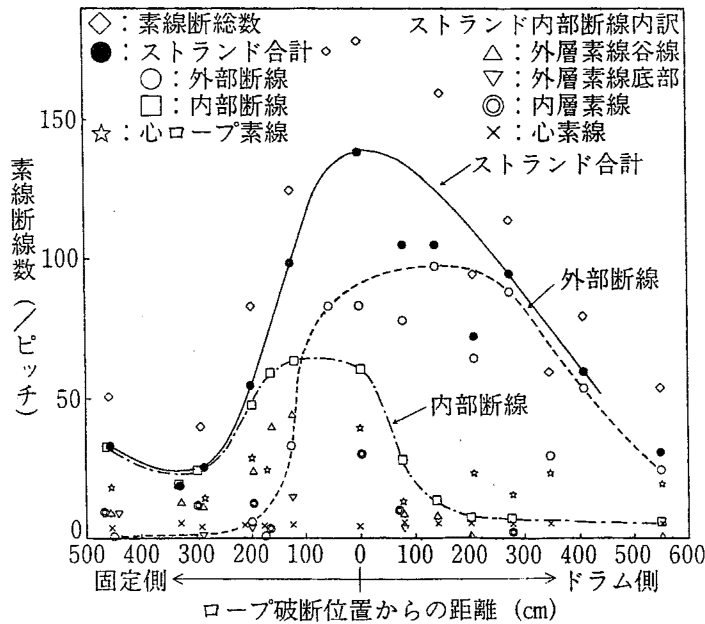


Fig. 9 Distribution of wire breakings in cross section and in longitudinal direction of the fractured wire rope
破断ワイヤロープの断面内および長さ方向での断線分布

また、これら素線の断線様式の詳細をフラクトグラフィ的に検討したが、事例 I と同様、横断面型の断線は疲労破面であり、せん断型は静的破断によって生じたものであることが確認された。

なお、本件ロープで全長にわたりグリースの不足状態、一部シーブの回転状態の不良が認められたが、本件事故の主因とはなり得ないと判断された。

(二) 破断強度の推定

(イ) に述べた作業状態において、力の釣合によって 14 本掛けした起伏ロープの張力 T_a を求めると約 8.14 kN (0.83 tf) となる。実際にはロープ重量や動的な負荷状態のためこの値より大きく、その 1.5 倍程度になった可能性が強い。

他方、破断端の全素線の断線状態から、ロープ強度の推定を試みた。疲労、腐食静破断および新鮮静破断の 3 種に分類し、事故時前 2 者は既に荷重負担能力はなく、新鮮な破面を有する静破断素線のみが荷重を負担したと仮定し、公称破断応力 (ロープ破断荷重 / 素線断面積総計) $\sigma_B = 9.81 \text{ MPa}$ (158.0 kg/mm²) と有効残存断面積総計 9.06 mm² との積として破断時の強度 S_a を求めると 14.0 kN (1.43tf) となる。なお、有効残存断面積は、算定の簡単化のため、健全な素線の 25, 50, 75, 100% に大別して求めた。

ところで、脱落部ではこれ以上に損傷が激しいと予想されること、事故時の素線の断線は全てが同じ瞬間とは考えにくいことなどから、実際のロープ強度は、この推定値より小さかったと判断される。そのことと、上記の作業状態からの推定値を勘案して、本件ロープの

破断時の強度はおよそ 11.8 kN (1.2 tf) と推定される。これは本件ロープの公称破断荷重 157 kN の 10% にも満たない値である。

(ホ) 結論

以上の調査、検討結果を総合すると、本件事故は直接には起伏ロープ破断部の強度がロープ破断荷重の 10% 程度にまで低下していたために生じたものと結論できる。このような著しいロープ強度の低下は、破断部近傍の素線の多くが摩耗および腐食損傷を受けると共に、それらによって促進された疲労破壊によって外部および内部で断線していたからである。

許容できないことが明白なこのようなレベルにまで損傷が進行した原因としては、点検不良やロープグリース補給不足にみられるような保守、管理の不良などが考えられるが、内部損傷が大きな役割を演じていることを見逃すことはできない。

2.3 事例 III: 150t クローラークレーンの巻上げワイヤロープの破断^{3,6)}

(イ) 事故の概要

防波堤建設工事において、150t クローラークレーンによって約 44t の防波コンクリートブロックを数 cm 吊り上げて一旦停止し、さらに巻き上げようとしたところ、主巻上げワイヤロープがジブの先端から約 4.8m 手前の位置で突然破断した。このため、破断したロープがジブ先端のシーブを抜け、同クレーンとブロックの間で写真を撮ろうとしていた被災者の頭部を打撃し即死させた。Fig. 10 は事故発生の概況を示す。

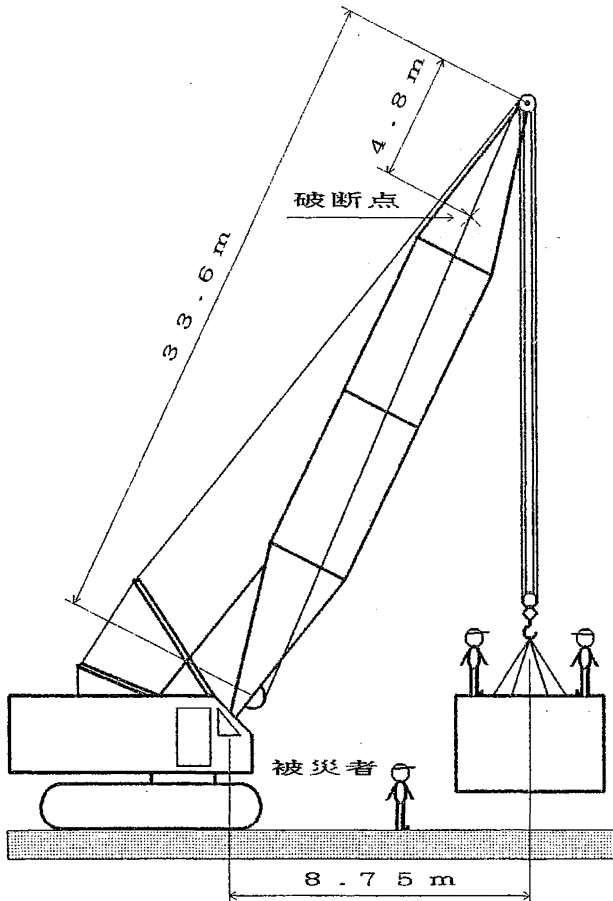


Fig. 10 The general situation of fracture accident of rifting wire rope
 巻上げワイヤロープ破断事故の発生状況

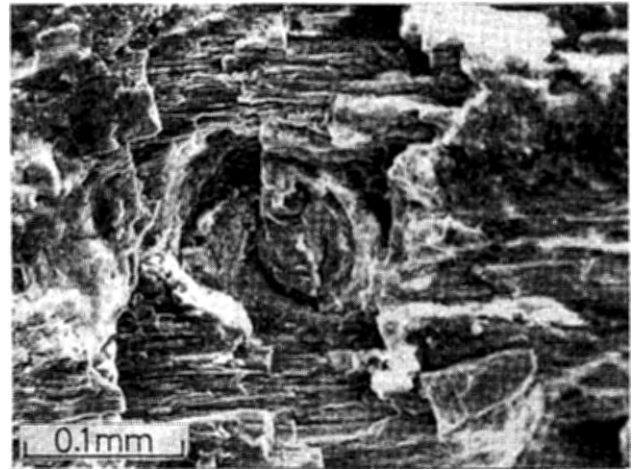


Fig. 12 An example of pit on formed on the corroded suurface of wire
 素線表面に形成された腐食孔の例

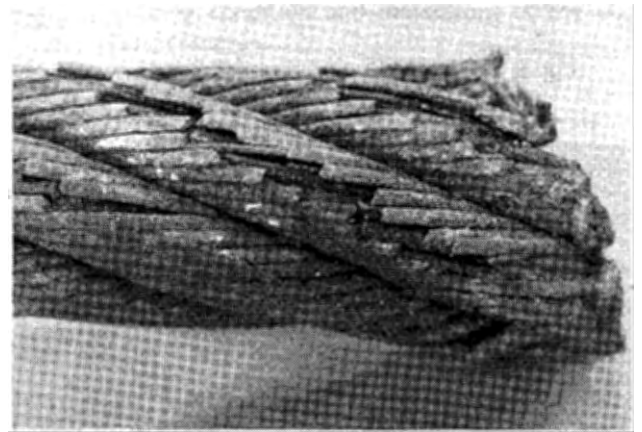


Fig. 13 Heavy abrasion of outernal wire observed near the fractured portion
 破断部近くでの激しい摩耗損傷

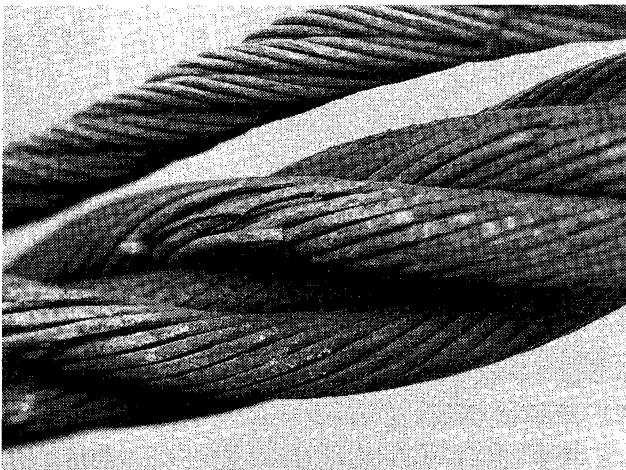


Fig. 11 The whole-surface corrossion of the fractured wire rope
 破断ワイヤロープの全面腐食状況

(ロ) 破断したワイヤロープ

破断したロープは、事例IおよびIIと同じく構成がIWRC6×Fi(29)で、公称径は28mm、公称破断荷重は588kN(60.0tf)であり、 $D/d = 22$ 、4本掛けにて、更新後1年4~8ヶ月間使用されていた。

(ハ) ロープの損傷破断状態

本件ロープの破断部近傍では Fig. 11 に示すように全体にわたって平均的な激しい腐食が生じており、しかもそれは外部のみではなくロープ内部にまで進行した状態である。腐食状況については走査型電子顕微鏡でも観察したが、それによっても腐食が相当進行していることが確認された。Fig. 12 は素線表面に形成された腐食孔の例である。分解調査によるとロープ全体にグリースが不足した状態になっており、このような激しい腐食は、適切な補給がなされていなかったためと判断された。

破断部近傍の広い範囲で観察される外部摩耗は直接事故に関連するほどではないが、破断端のすぐ近くおよび他の1箇所に Fig. 13 に示すような特に激しい摩耗損傷が生じている。この部分を分解調査したところ、いずれのストランドにおいても、ロープ1ピッチの間で外層素線が半数以上、また細かいフィラー素線が全て

断線していた。

ロープ分解調査から、破断部近傍で最も断線の多い部分のストランド素線の残存数の割合は50%、それらの腐食による減肉が少なくとも20%であり、心ロープの荷重支持能力はないと推測されたが、その評価結果からロープの強度は200 kNの程度と推測される。しかし、実際の破断部はこれよりさらに強度が低いはずであり、事故時の荷の吊り状態から推定されるロープ張力107 kNに動荷重による増加分を加えた負荷(120~130 kN)で破断したものと判断される。

(二) 結論

本件ワイヤロープの破断は破断部近傍でのクレーン構造規格の許容値を超える著しい腐食、摩耗および素線断線のため、その部分のロープ強度が3分の1以下に低下していた上に、本来5本掛け以上とすべきところを4本掛けにて作業したため生じたと判断される。そのような損傷の原因は、直接的にはロープグリース補給不足に代表される保守・点検の不良と判断される。しかし、本件の場合、全体に損傷が外部より内部で激しいのが特徴で、そのために損傷状態の正確な判断ができなかったことも重要な因子と考えられる。

3. 事故例から推定されるIWRCワイヤロープの損傷の特徴と問題点

移動ロープとして使用されていたIWRCワイヤロープの破断事例を3件紹介した。事例IおよびIIはいずれも内部で先行した疲労断線損傷が根本的な原因になっている。著者が最近調査した上記以外の数件の事例についても全く同様の損傷様式が確認された⁷⁾こと、さらには類似構成のワイヤロープについての米国での実験結果でも同様の損傷様式が認められていること等から判断すると、この種のワイヤロープが曲げ疲労を受ける場合、元々、損傷が外部より内部の方でより早期に進行する特性のあることが推測される。

一方、事例IIIの損傷は外部より内部での著しい損傷が主体であった。これは一つには繊維心に比べロープ心の方がグリースの浸透・保持能力が劣るためと考えられるが、もう一つには、内部における摩耗および疲労損傷が相当激しく、それと腐食が競合して損傷の内部先行性を一層顕著にしたものと推測される。

すなわち、IWRCワイヤロープを移動ロープとして使用した場合、繊維心ロープの場合に比べ、主な損傷が外部よりも内部で先行し易いという特性があると推測される。

ところで、クレーン用ワイヤロープの安全な使用のため、クレーン構造規格では数種の損傷形態について

の廃棄基準を定めている。しかし、そこでは損傷検出法までは定めておらず、現状では実的な方法として肉眼による外観検査が常識となっている。

しかし、主な損傷が内部にある場合には、たとえそれが危険なレベルを超えていても、この方法では検出することは実際上不可能であり、安全確保のための検査法としては十分なものとは言えない。紹介した事故例はこのような背景が主因となって生じた事故の典型ではないかと思われる。

4. おわりに

以上の事故例の検討結果から、IWRCワイヤロープの破断事故においては内部損傷が重要な役割を果たすことが多いことは明らかである。しかし、内部先行型の損傷が生じる条件は明確になったわけではない。この不安な状況を打開するためには実際にワイヤロープが使用されると予想される、不適切な条件も含めた、広い範囲の条件について系統的な実験を行うことが不可欠と思われる。

このような事情を考慮して、本特別研究においては、ワイヤロープの疲労試験機を導入し、IWRCワイヤロープの内部損傷発生特性の解明のための研究を企画した。それについては次章で報告する。

参考文献

- 1) 田中正清, ドッククレーンジブ落下事故調査報告書(1989).
- 2) 田中正清, ワイヤロープの内部損傷と問題点, セーフティエンジニアリング, 第17巻第4号(1991), pp. 6-11.
- 3) 田中正清, クレーン用ワイヤロープの内部損傷特性と同損傷による自己の防止対策, クレーン安全大会研究発表予稿集(1995. 12. 6) pp. 103-117.
- 4) 田中正清, クレーン用ワイヤロープの破断事故例, 日本機会学会第5回交通物流部門大会講演論文集, No. 96-51(1996. 12月).
- 5) 田中正清, ワイヤロープの破断による災害時例と対策, 安全衛生コンサルタント, Vol. 19, No. 51(1998), pp. 32-36.
- 6) 田中正清, クローラクレーン巻上げワイヤロープ破断事故調査報告書(1989).
- 7) たとえば, 田中正清, 35トンクローラクレーンジブ起伏ワイヤロープ破断事故調査報告書(1990).

(平成10年11月20日受理)