

3. クレーン用ワイヤロープにおける内部損傷発生特性

田中正清*

3. On the Properties of Internal Damage of Crane Wire Ropes

by Masazumi TANAKA*

Abstract: As it was introduced in the previous chapter, the precise investigations on the crane wire rope fracture accidents showed that the remarkable internal damages formed prior to the accident were found in many cases in IWRC (independent wire rope core) wire ropes.

If this kind of damages were formed even under the usual working conditions, the present inspection system would be insufficient, because the usual inspection mainly depends on the external observation by naked eyes and therefore the internal damages usually could not be detected correctly.

However, it is not clear whether such supposition is true or not, because the working conditions or history of working loads could not be confirmed for all cases of accidents, and under such situation it would be difficult to decide the target of studying countermeasures for preventing the accidents of this kind.

In this study, therefore, to improve such ambiguous situation, a thorough experimental investigation mainly consist of S-bending fatigue tests and the following precise analysis of damaging condition of the ropes was carried out to certify at first whether the remarkable internal damage as mentioned above could be formed even under the allowed loading conditions, and then to confirm the relations between the fatigue damaging conditions and the various testing conditions referring to the real working conditions.

The main results obtained are as follows.

- (1) Two kinds of IWRC wire ropes showed the remarkable internal wire breaking damage in many cases preferential to the external ones under the S-type bending fatigue, not only under the allowed D/d (ratio of sheave diameter to rope diameter) and the rated loading condition as the basic ones for this study, but under other mechanical conditions with the rope tension and load frequency widely changed.
- (2) They also showed the similar internal wire breaking damage under the S-type bending fatigue in many cases excluding limited conditions, under the environmental conditions of insufficient rope grease, clean water dropping and salt water dropping.
- (3) Under the U-bending condition, essential damages for both wire ropes were also the internal ones, although the external wire breakings were more than those in case of S-bending.
- (4) From such results, it may be concluded that the IWRC wire rope, when it is used as a travelling wire rope, has a characteristic that the internal damages are apt to occur prior to the external ones.
- (5) Nevertheless the IWRC wire ropes with such characteristics are widely used for cranes, the present inspection method practically relies on the external observation by naked-eyes which

can not essentially detect the internal damages. This situation seems to be fairly uneasy ones, and it is necessary to take any countermeasure to improve it in a hurry.

- (6) It wouldn't be an appropriate method to prevent the internal damages by means of the change of working conditions when the IWRC wire ropes were used for cranes. Hereafter, it would be important, for example, to develop the simple and convenient NDT (Non Destructive Testing) methods capable of detecting damages in the ropes even if those were the internal ones, and/or to study a method to make the discarding standards more strict, and so on.

Keywords; Crane, Wire rope, Fracture accident, Wire breakings, Internal damage, Bending fatigue, Environmental effects, Non destructive test, Discarding standard plasma chemical reaction, surface discharge, corona discharge, decomposition, NOx, VOC, ozone

1. 緒 言

現在、我が国においては、クレーン用として鋼心入り (IWRC) ワイヤロープが多用されているが、この種のワイヤロープの破断による災害がかなりの件数発生した^{1,2)}。前章では、それらのうち著者が直接調査した代表的事例³⁾を紹介し、調査結果として、これらの事例においてはロープ内部での断線損傷が外部より先行した状態で破断した事例が多いことを指摘するとともに、同種のワイヤロープ破断事故を根本的に防止するためには、(1) IWRC ワイヤロープを移動ロープ (動索) として使用する場合の内部損傷発生特性 (内部断線損傷の促進あるいは抑制因子など) を明確にするか、(2) 内部損傷であっても検出の可能な検査法を開発するかのいずれかが不可欠であることを指摘した。

本研究ではその中の (1) の目的を達成するため、現在我が国でもっとも多く使用されている 2 種の IWRC ワイヤロープについて S 曲げ疲労試験を実施し、許容使用条件下で有意なレベルの内部損傷が生じるかどうかを断線損傷に着目して検討するとともに、実用上重要と思われるいろいろな因子が内部断線損傷発生状態にどのように影響するかを詳細に検討した。

なお、(2) の方向での対策については第 6 章で若干の検討を行っている。

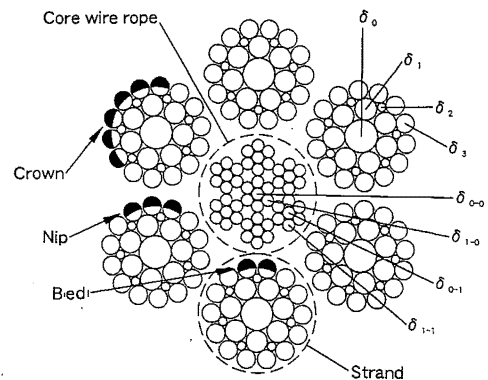
2. 実験方法

2.1 供試ワイヤロープ

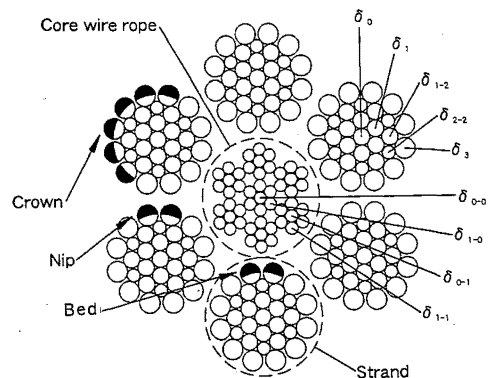
本研究に用いたワイヤロープは市販の IWRC 6× Fi (29) および IWRC 6× WS (31) の 2 種で、いずれも o/o タイプ (普通 Z より、赤グリース塗布、裸) B 種で、直径 16 mm である。それらの断面構成を Fig. 1 に示す。同図には一般に使用されている構成記号 (δ_0 , δ_{1-1}) の他に、断面内での位置の一般的な呼称を示し

ている。

IWRC 6× Fi (29) はストランド (子縄) 6 本で、また各ストランドは外層素線 (δ_3) 14 本、内層素線 7 本、内外層の隙間にフィラー線 (δ_2) 7 本がはめこまれ合計 29 本で構成され、フィラー線を除く 6 本のストランド総素線数は 132 本である。なお、未試験状態でのロープピッチは約 97 mm、ストランドピッチは約 38 mm である。



(a) IWRC 6× Fi(29)



(b) IWRC 6× WS(31)

Fig. 1 Construction of test wire ropes
供試ワイヤロープの断面構成

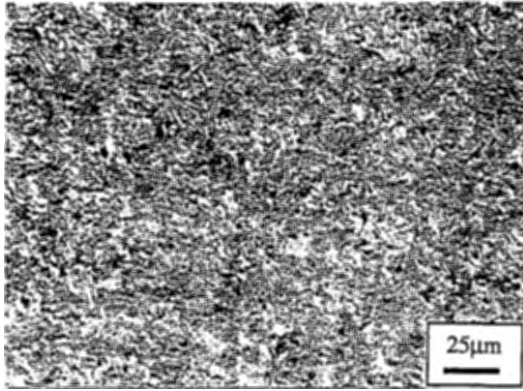


Fig. 2 Microstructure of the wires of test rope
供試ロープ素線の微視組織

Table 1 Chemical compositions of test wire
供試ロープ素線の化学成分

Material	C	Si	Mn	P	S
JIS G3506	0.63	0.26	0.49	0.011	0.015
SWRH 62A	0.59 ~0.56	0.15 ~0.35	0.30 ~0.60	≤0.040	≤0.040

Table 2 Diameter and sectional area of each wire
素線の直径および断面積 (IWRC 6× Fi(29))

Wire (c.f. Fig. 1)	Wire of strand				Wire of core repe			
	δ_0	δ_1	δ_2	δ_3	δ_{0-0}	δ_{1-0}	δ_{0-1}	δ_{1-1}
Diameter (mm)	1.52	1.09	0.42	0.94	0.85	0.75	0.75	0.72
Sectional area (mm ²)	1.81	0.93	0.14	0.69	0.57	0.44	0.44	0.44
Used number	1 × 6	7 × 6	7 × 6	14 × 6	1 × 1	6 × 1	1 × 6	6 × 6
Total area (mm ²)	10.89	39.19	5.82	58.29	0.57	2.65	2.64	14.66
Total sectional area of the rope					134.73 mm ²			

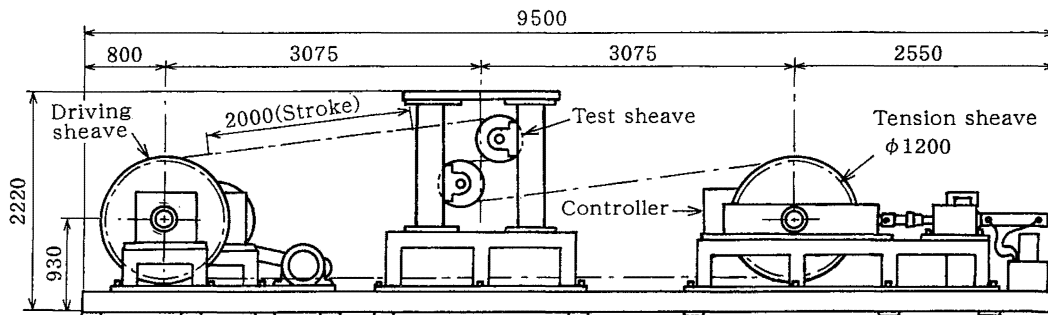


Fig. 3 Wire rope fatigue testing machine
新規に導入したワイヤロープ疲労試験機

一方、IWRC 6× WS(31) は同じくストランド 6 本、各ストランドは外層素線 12 本、第 2 層素線の太い方が 6 本、細い方が 6 本の計 12 本、第 3 層素線 6 本の合計 31 本で構成され、ストランド素線の総数は 186 本である。未試験状態でのロープピッチは約 115 mm、ストランドピッチは約 28 mm である。

両種ワイヤロープいずれにおいても、ストランド外層素線は内層に対して（塑性変形によって）形付けされ、断線しても破断端が跳ね上がりにくくなっている。

また素線はいずれも 980°C 焼入れ 585°C 焼戻しの熱処理を施した Fig. 2 に示すようなマイクロ組織を有する硬鋼線材で、その化学成分は Table 1 に、線径は IWRC 6× Fi(29) について Table 2 に示す通りである。

素線の引張り強さは約 1830 MPa、ワイヤロープの公称破断荷重は両種ともに 173 kN である。

両種ワイヤロープは共に、柔軟性、耐疲労性、耐摩耗性のバランスが良いとされ、クレーンのジブ起伏及び巻上げロープなどに幅広く使用されている。

2.2 試験装置⁴⁾

試験装置は本実験のために製作したもので、Fig. 3 に示すように本体フレーム、左側の駆動シープ部、中央の試験シープ部（シープスタンド）、右側の油圧シリンダーと連結した緊張シープ部、および制御部から構成され、ワイヤロープに一定の張力を与えた状態で試験シープを往復回転させることによってワイヤロープに繰返し曲げを与えることができる比較的標準的な装置である。標準の往復動ストロークは 2m である（クランク取り付け位置変更により 1.5m も可能）。

曲げ方式は同図に示した様な S 曲げのほかにシープを 3 個使用してのダブル S 曲げおよび試験シープを緊張シープ取り付け台に設置しての U 曲げが可能である。試験シープの材質は焼入れ焼戻し処理した炭素工具鋼 SK3(JIS G4401) で、みぞの半径は試験ロープの半径 8 mm よりやや大きめの 8.3 mm とした。

2.3 試験条件

本実験での曲げ疲労試験は、前章での事故例でジブ起伏ワイヤロープの破断が多かったこと、試験の能率等を考慮し、基本的には S 曲げ方式で実施した。S 曲げ状態は Fig. 4 に示すように、試験部の二つのシープで 180°の完全な折り返しとし、中間の直線部長さは次に定義するシープピッチ円直径 D と同じとした。

シープに掛かるワイヤロープの中心線が描くピッチ円の直径 D とロープの直径 d の比 D/d は 16（クレーン構造規格で巻上げ及びジブ起伏ワイヤロープに許容される最小値に相当）、ロープに掛ける一定張力は許容使用荷重（ロープの公称破断荷重の 1/5）に相当する 34.6 kN、繰返し速度 10 cpm を標準条件として採用した。なお、本実験では便宜上ロープの往復動の回数を単に繰返し数と呼ぶことにする。

また、実際のクレーンワイヤロープが遭遇しそうな条件での損傷発生状態を調べるため、 D/d を標準の 16 から小さい側で 12.8、大きい側で 20 および 25 に変えた条件、ロープ張力を標準の 3/4 及び 1/2（それぞれ 26 kN および 17.5 kN）に低下させた条件、曲げの繰返し速度を標準の 10 cpm から 7 および 4 cpm に低下させた条件、それらの条件の組み合わせとしてロープ張力は 1/2 で曲げ後繰返し速度を 4 cpm に落とした条件、力学的条件は標準のままにしてロープグリースを除去した条件および環境条件の変更として清水及び食塩水滴下の条件、さらには曲げ方式を変えた U 曲げ条件のもとでの実験を実施した。

ロープグリース除去条件は石油中で超音波洗浄によってロープグリースを完全に除去し、さらにシープ溝の

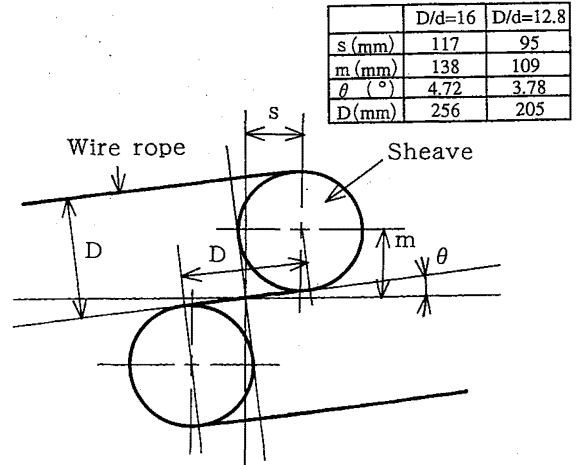


Fig. 4 Sheave arrangement for S-bending test
S 曲げ疲労でのシープ

グリースを除去した状態で、また、環境中試験はとくに試験シープの軸受け部分に環境水が漏れないよう工夫したアクリル樹脂板及びビニールシート製のフードでロープ試験部分を覆い、二つの試験シープのそれぞれ真上から試験ロープに環境水を滴下しながら実施した。清水の場合は水道水を流し放しとし、食塩水の場合は 3% NaCl を溶解させたイオン交換蒸留水 20L を循環させた。

また、U 曲げ条件での試験は Fig. 1 で示す中央試験シープ部のスタンドを取り除き、緊張シープ取り付け台の左端に試験シープを設置して、駆動シープと試験シープとの間に直接ロープを張って実施した。この場合の試験シープでのロープの開き角は約 3.5°である。

2.4 素線断線数の測定

(1) 可視断線数

疲労試験中、適当な繰返し数（疲労初期は 1000 ないし 2000 cycle ごと、疲労の後期の 10% 可視断線に近くにつれ間隔を狭めて最終的には 100 cycle ごと）において往復動を停止させ、緊張力は保持した状態で、試験ロープ中央部の曲げを受ける 20 のロープピッチ（以下単にピッチ）について 1 ピッチごとの素線断線箇所数（以下断線数）を目視によって数え、これを可視断線数 C_v として記録した。試験ロープ中心位置から左側に L1~L10、右側に R1~R10 とピッチ番号を付けた。

(2) 実素線断線数

各ピッチの可視断線数 C_v の最大値 $C_{v,max}$ が、現在一般的に採用されているロープ廃棄基準であるストランド素線総数の 10% (IWRC 6× Fi(29)) で 13 本、IWRC 6× WS(31) で 18 本に達した時点で試験を中止し、上記の L10~R10 の範囲を 1 ピッチごとに切断し、ロープを各々の素線にまで分解して、ストランド

別に、Fig. 1 に示した素線の種類別、素線位置別（外層素線 outer layer wire の山部：crown，谷部：nip および底部：bed，内層素線：inner layer wire (IWRC 6×WS(31) では第2層および第3層素線)，および心素線：core wire) に素線断線数を数えた。

なお、一般にワイヤロープの強度に主な影響を有するのはストランド素線の断線であるので、心ロープ (core wire rope) の素線断線は検討対象から除外した。

2.5 ロープ損傷状態の観察

試験したワイヤロープの全体的損傷状態を肉眼的に観察するとともに、素線の損傷、破断状態については SEM (走査型電子顕微鏡) による観察を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 標準条件におけるロープの損傷特性⁵⁾

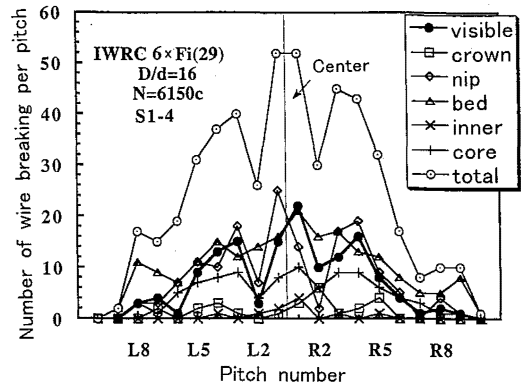
(1) 素線断線の分布状態

本実験の標準条件 ($D/d = 16$ ，ロープ張力は破断荷重の $1/5$ の 34.6 kN，繰返し速度 10 cpm) にて S 曲げ疲労試験を実施し、それぞれの試験片での可視断線数最大値 $C_{v,max}$ 10% に達した段階 (以下 10% 断線寿命と呼ぶ) で断線損傷状態を調べた結果を、両種ロープについてそれぞれ一例ずつ Fig. 5(a) および (b) に示す。同図には、位置別の素線断線数とともに可視断線数 (visible) のロープ長さ方向の分布を示している。

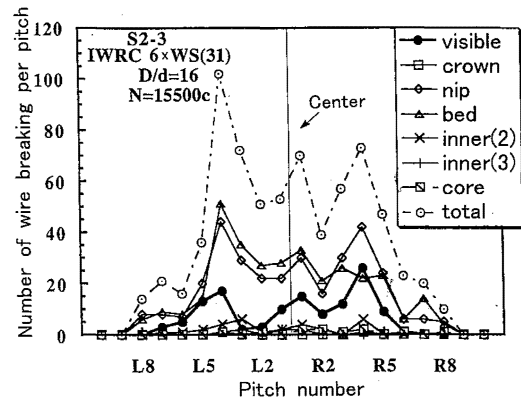
a. IWRC 6×Fi(29) についての結果

Fig. 5(a) によると、ピッチによってかなりデータはばらつきはあるが、全体的には、谷部 (nip) 断線が最も多く、次いで底部 (bed) 断線、さらには心素線となっており、外層素線の山部 (crown) 断線が比較的少なくなっている。この傾向はこの試験片についてのデータだけでなく、可視断線数がストランド総素線数の 5%~15% の範囲にある約 10 本の試験片の損傷状態のデータでも全く同じであった。これら位置別断線数を可視断線数と比較すると、このロープの場合、可視断線として検出されたのは、可視断線の観察中でも予想されたことではあるが、山部断線と谷部断線の一部であったことが分かる。

なお、同図での断線数の分布データは、中心部が高く両端が低い山形になっているが、これは 1 回の S 曲げの繰返しにおいて、目的通り完全に 4 回の曲げ変形を受ける部分が、このロープで $D/d = 16$ の場合、中央部 10 ピッチだけで、それより外側にいくほど S 曲げ状態が不十分となるためである。



(a) IWRC 6×Fi(29)



(b) IWRC 6×WS(31)

Fig. 5 Distribution of visible wire breaking and wire breaks at various structural positions
可視断線数および位置別断線数の分布

b. IWRC 6×WS(31) についての結果

Fig. 5(b) の場合、上記の IWRC 6×Fi(29) の場合と比べると、外層素線の谷部 (nip) 断線が顕著であり、それと底部 (bed) での断線で大半を占め、山部 (crown) 断線、ストランドの内層素線 (inner(2),(3)) および心素線 (core) での断線が非常に少ないのが特徴である。また、可視断線の割合は IWRC 6×Fi(29) の場合に比べさらに小さくなり、内部断線の先行性が一層顕著となっている。この場合の可視断線は谷部断線の極く一部 (2 ないし 3 割) が大半を、残りわずかを山部断線が占めている。

本実験の標準条件はクレーン等構造規格で許容された使用条件である。この結果から少なくとも許容された条件においても上記のように両種のロープとも内部損傷先行性が存在することが確認された訳である。

このことは、肉眼による外観検査では内部損傷の検出がほぼ不可能であるのに、もっぱらそれに依存している現行の検査法には、少なくとも問題のあることを示しており、何らかの対応が必要と考えられる。

(2) 破断寿命について

S 曲げ繰返し数 N の増大につれて断線損傷が増加する状態についての詳細は次章で検討しているが、10%断線寿命 N_e はロープ破断寿命 N_f に対して IWRC 6× Fi(29) で 90%強、IWRC 6× WS(31) で 80%強であり、この N_e の損傷状態が両種ロープとも破壊までの残り寿命が非常に少ないかなり損傷の著しい段階に相当していることが分かる。

なお、10%断線寿命の平均繰返し数 N_e^* は IWRC 6× Fi(29) で 6100 cycle、IWRC 6× WS(31) では 14000 cycle で、寿命から判断した場合には後者のロープの方がかなり有利かと思われる。破断寿命については D/d の影響を含め後出の Fig. 14 を参照されたい。

(3) 素線の損傷および断線状態

本実験の範囲では、素線断線以外のはっきりした損傷は摩耗だけであり、摩耗がロープの強度および寿命に影響するのは外層素線の山部、谷部および底部においてである。両種ロープを通じて最も著しい摩耗はストランド同士の接触点である外層素線谷部であり、次いでシーブとの接触点の山部となっており、底部では最も軽微となっている。

摩耗と断線の関係を見ると、山部および谷部での断線は全て摩耗部分の中で生じている。しかし、底部での断線はかならずしも摩耗の最も顕著な位置だけでなくほとんど摩耗のみられない部分でも生じている。この事実は、素線の疲労き裂の発生と伝ばによる断線が、摩耗を伴う疲労（いわゆるフレッティング疲労：第5章参照）によって促進されてはいるが、それは摩耗量の大小だけでなく、繰返し応力の大きさによって大きく支配されていることを示すものと思われる。

(4) 素線破断面の特徴

本件ワイヤロープの素線の断線は全て疲労破壊したものであり、破断面は素線軸に垂直な疲労破面と最終静破断域から構成されている。Fig. 6 にその一例を示す。ワイヤロープの素線の破断面形態については、以前、いろいろな負荷様式での破断面について著者が詳細に検討している⁶⁾が、本件の素線の破断面形態の特徴はその場合確認した疲労破面と同じである。

一般に素線材の疲労破面には疲労破壊の代表的な微視破面形態であるストライエーションは形成され難いといわれている。しかし、本件の素線では最終疲労域にはあるが Fig. 7(a) に示すようにはっきりしたその形態が観察された。また疲労破面の大半は結晶粒を貫通して形成されているが、起点部近くでは Fig. 7(b) に示すように結晶粒の境界にそって粒界破壊した例も観察された。

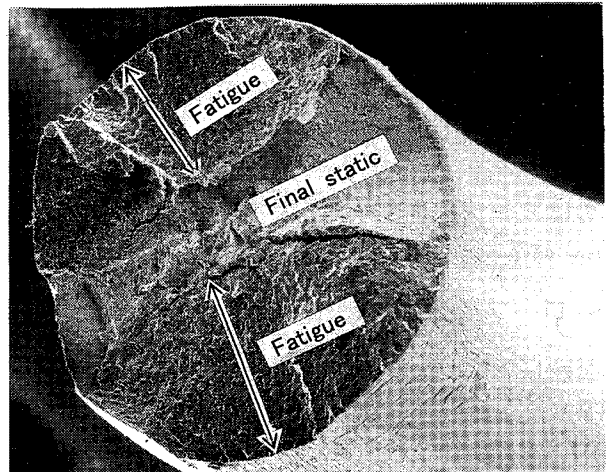
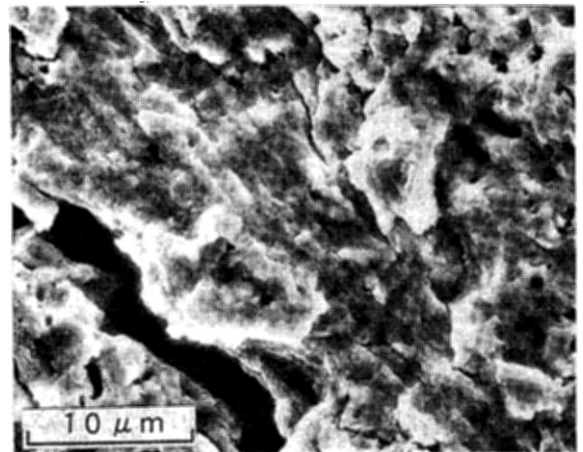
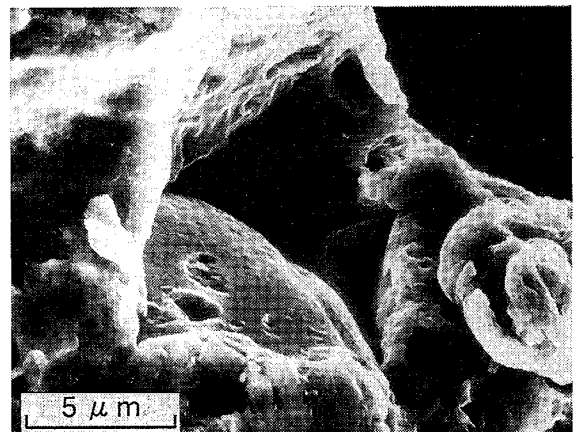


Fig. 6 Example of wire breaking from light abrasion at the bed position
底部での軽い摩耗部からの素線破壊の例



(a) Striations formed on the final fatigue fractures
疲労破面で観察されたストライエーション模様



(b) Intergranular fractures at the area of fatigue crack initiation
起点部に形成された結晶粒界的破面

Fig. 7 An example of microfractograph of fatigue fractures of wire
素線破断面の微視的破断面形態の例

3.2 断線損傷特性に対する D/d の影響⁵⁾

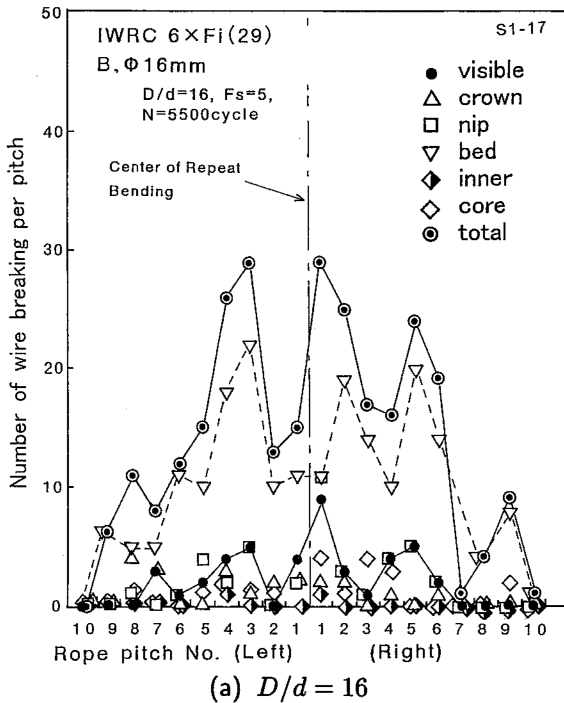
ロープ張力および繰返し速度は標準（それぞれ定格荷重相当の 34.6 kN, および 10 cpm）のままにして, D/d のみを標準の 16 より小さい側で 12.8, 大きい側

で 20 および 25 に変更して S 曲げ疲労試験を実施し, 10% 可視断線時の断線分布状態を調べた。

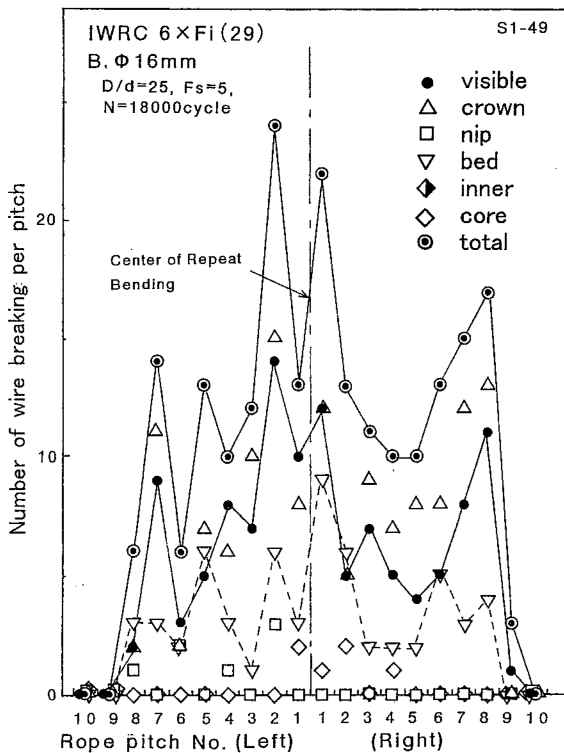
(1) IWRC 6×Fi(29) について

このロープについて, $D/d = 16$ および 25 の場合の断線分布状態の調査結果をそれぞれ Fig. 8(a) および (b) に示す。 D/d が変わると, それぞれの位置での断線数の相対的割合が変わり, 従って, 総断線数に対する可視断線数の割合も変わることが分かる。

Fig. 9 はその状態を位置別断線数と D/d の関係をとって示している。この図では断線数としては, ロープ試験部のうち完全な S 曲げ疲労を受ける (1 cycle で 4 回曲げられる) 領域に含まれるピッチ ($D/d = 12.8, 16, 20, 25$ に対しそれぞれ 12, 10, 8, 4 ピッチ) についての平均値を用いているが, 本実験の範囲では, D/d の増大につれて山部断線は増大し, 逆に, 底部および



(a) $D/d = 16$



(b) $D/d = 25$

Fig. 8 Influence of D/d on the distribution of wire breaking (IWRC 6×Fi(29))
IWRC 6×Fi(29) 位置別断線損傷分布状態に対する D/d の影響

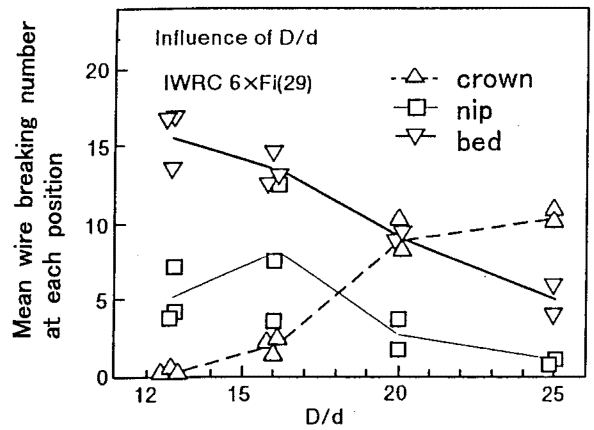


Fig. 9 Influence of D/d on the distribution of mean wire breaking number at each position
IWRC 6×Fi(29) の位置別断線損傷数 (平均値) 分布状態に対する D/d の影響

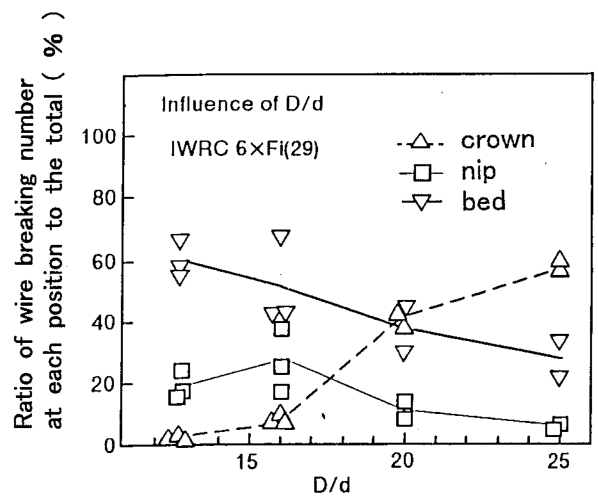


Fig. 10 Influence of D/d on the distribution rate of wire breaking at each position
IWRC 6×Fi(29) の位置別断線損傷数の割合の分布状態に対する D/d の影響

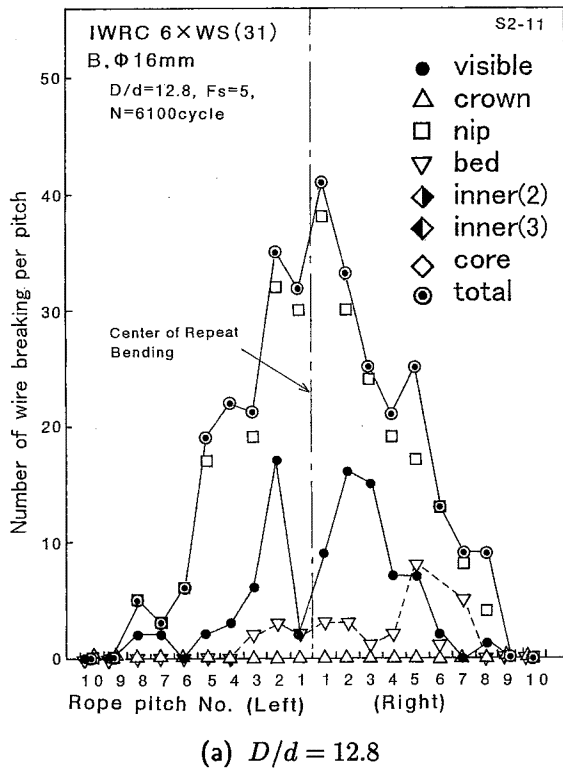
谷部断線は減少しており、断線状態は D/d によって系統的な影響を受けている。なおこの場合、内部断線の一部である内層素線および心素線の断線の数、全般

的に少ないことを考慮し、省略している。

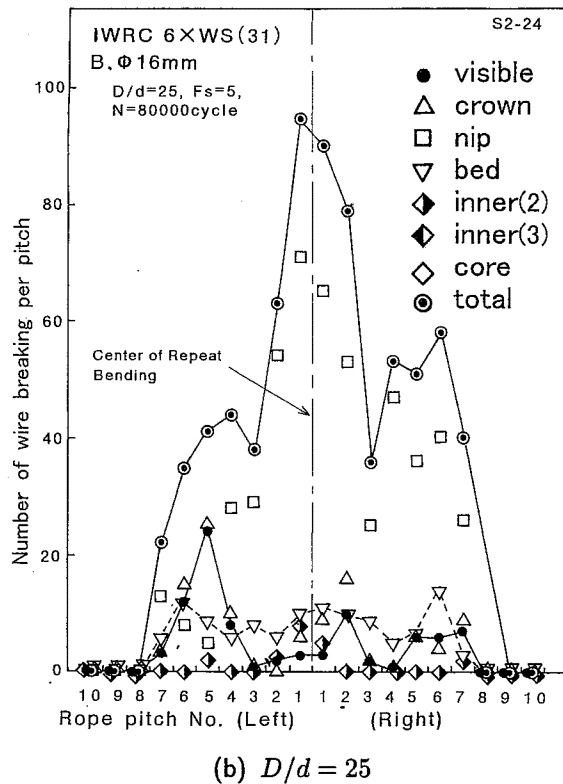
Fig. 10 は同じ D/d との関係をストランド素線総断線数に対する位置別の平均断線数の割合 R をとって示したものである。当然ながら前図と似た結果になっている。底部断線には前図と違って $D/d = 16$ に山があるが、これは $D/d = 12.8$ で内層素線および心素線の断線が非常に多く、山部および谷部断線の割合が低くなったためであり、内部損傷全体の割合はやはりこの条件が最大である。

結局、このワイヤロープを安全率 5 の負荷条件で使用するには、 D/d の増大に伴って、山部断線の著しい増加が底部および谷部の断線の減少を凌駕し、可視断線数の割合が増加するため、肉眼観察での損傷検出可能性が高まり、安全上からは好都合である。

可視断線率が 50% を超える程度であれば、外観検査による危険な状態の見落としは極めて希となると考えられる。したがって、上記の結果から判断すれば、本



(a) $D/d = 12.8$



(b) $D/d = 25$

Fig. 11 Influence of D/d on the distribution of wire breaking (IWRC 6xWS(31))
IWRC 6xWS(31) 位置別断線損傷分布状態に対する D/d の影響

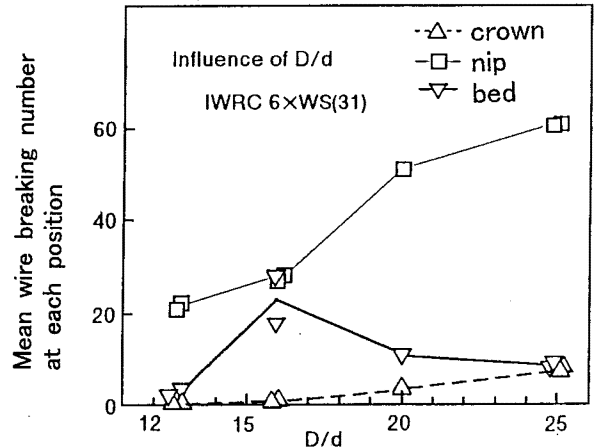


Fig. 12 Influence of D/d on the distribution of mean wire breaking number at each position
IWRC 6xWS(31) の位置別断線損傷数 (平均値) 分布状態に対する D/d の影響

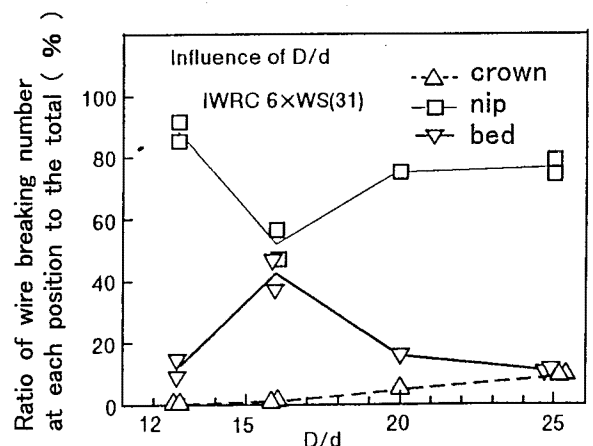


Fig. 13 Influence of D/d on the distribution rate of wire breaking at each position
IWRC 6xWS(31) の位置別断線損傷数の割合の分布状態に対する D/d の影響

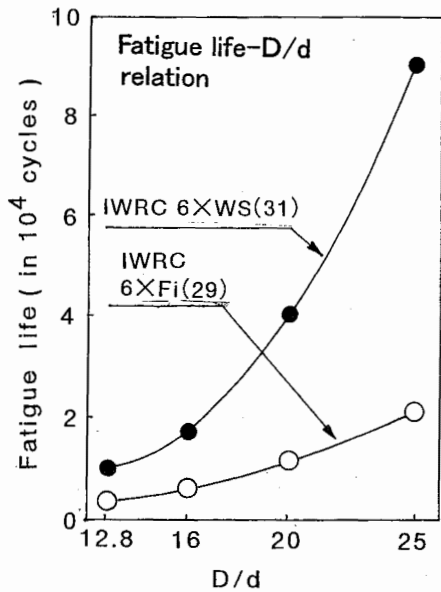


Fig. 14 Relationship between fatigue lives and D/d of test wire ropes
供試ワイヤロープの破断寿命と D/d の関係

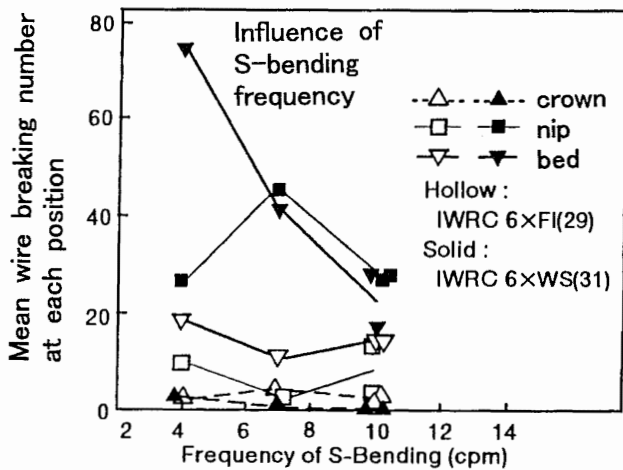
実験におけるような安全率5の厳しい負荷条件において IWRC 6× Fi(29) ロープを使用する場合、 D/d としては20以上の程度を推奨すべきであろう。

(2) IWRC 6× WS(31) について

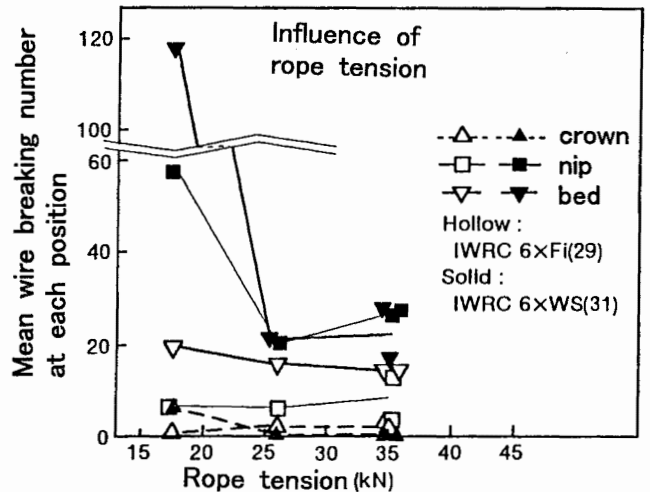
このワイヤロープについても D/d を4段階に変更してストランド内の位置別素線断線分布状況を調べた。その結果の例を $D/d = 12.8$ および25の場合についてそれぞれ Fig. 11(a) および (b) に示す。

Fig. 12は Fig. 9の場合と同様に D/d に対して完全S曲げ領域の位置別素線断線数の平均値を整理したものである。IWRC 6× WS(31)の場合、IWRC 6× Fi (29)とは異なり、主な断線は全試験範囲において谷部断線からなっており、その断線数 D/d の増加とともにはっきり増加している。それに対して、山部断線は D/d とともにわずかながら増加しているが絶対数が非常に少なく、 D/d への依存性は小さい。

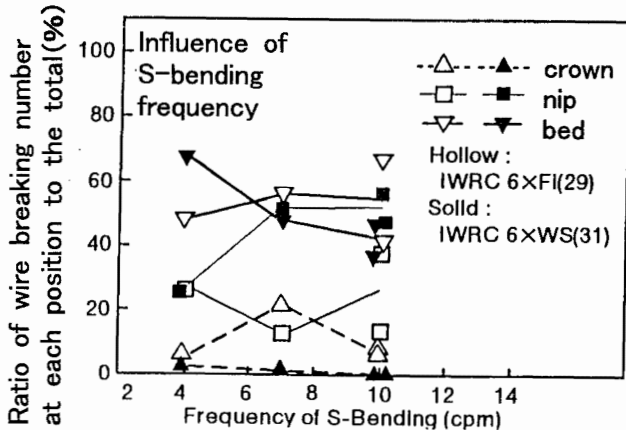
Fig. 13は Fig. 10と同じようにストランド素線断



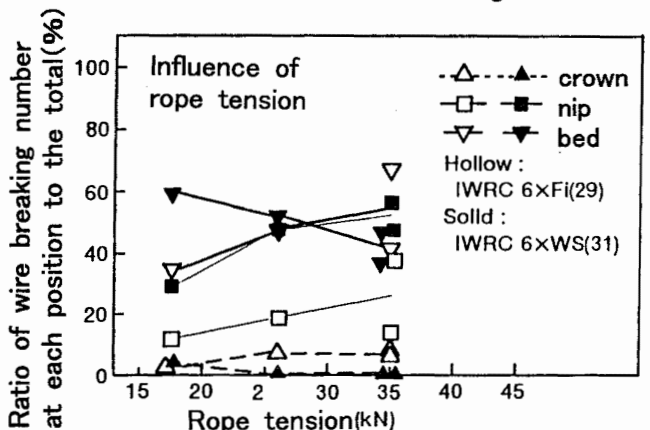
(a) Influence on the mean wire breaking number



(a) Influence on the mean wire breaking number



(b) Influence on the rate of wire breaking number



(b) Influence on the rate of wire breaking number

Fig. 15 Influence of rope tension on wire breaking damage
素線断線損傷へのロープ張力の影響

Fig. 16 Influence of S-bending frequency on the rate of wire breaking
素線断線損傷へのS曲げ繰返し速度(周波数)の影響

線総数に対する位置別素線断線数の平均値の割合 R と D/d との関係を示したものである。この図からもこのワイヤロープの主な損傷が、 D/d の全試験範囲で谷部を主とする内部断線として生じていることが良く分かる。従って、このロープの場合、IWRC 6× Fi(29) とは異なり、 D/d の変更によって内部損傷を回避する方法は採用できないことになる。

(3) 破断寿命について

D/d を変更した場合の両種ロープの破断寿命の変化を Fig. 14 に示す。破断寿命は両種ロープいずれも D/d の増加に連れて一様に、ほぼべき乗関数的に増加している。この図から、先に述べたよりも広い範囲の D/d において、IWRC 6× Fi(29) より IWRC 6× WS(31) の方が破断寿命が3倍以上大きく、その意味で、安全上からも有利なことが分かる。ただ、寿命の長いものを利用すること自体は問題ないが、それは損傷状態のチェック体制の改善と言う意味での対策にはなっていないことをはっきり認識しておく必要がある。

3.3 断線損傷特性に対するロープ張力の影響⁷⁾

両種ワイヤロープの素線断線状態に対するロープ張力低下の影響についての実験結果を、前節同様に位置別の平均素線断線数、それらの素線総断線数に対する割合 R について、それぞれ Fig. 15(a) および (b) に示す。

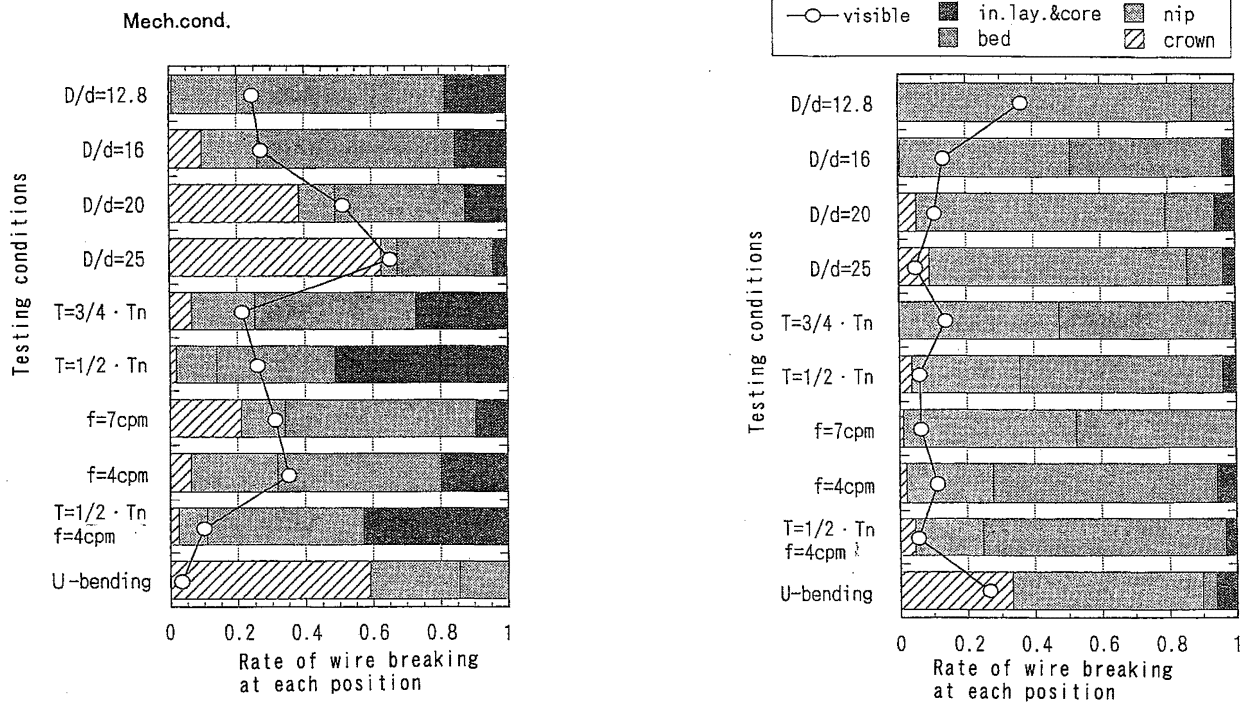
Fig. 15(a) においては、張力が定格の 1/2 において IWRC 6× WS(31) の谷部および底部での断線数が非常に大きくなっている。しかし、ほかのデータのロープ張力依存性は同図 (a) および (b) いずれにおいてもわずかであるかほとんど無い状態であり、この実験範囲に関する限り、標準（定格）条件で観察された「内部損傷が山部損傷に先行して進行するという特性」に基本的な変化はないものと判断される。

このような結果は、内部損傷は負荷条件が厳しい場合の方が生じやすいと言う一般の予想とは異なるものであり注目すべき結果と考えられる。

3.4 断線損傷特性に対する曲げ繰返し速度の影響

両種ワイヤロープの素線断線状態に対する曲げ繰返し速度の影響についての実験結果を、前節同様に位置別の平均素線断線数および素線総断線数に対するそれらの割合 R について、それぞれ Fig. 16(a) および (b) に示す。

この場合も上記のロープ張力の低下の効果と良く似ている。すなわち、Fig. 16(a) において、IWRC 6× WS(31) の底部での断線数が非常に多くなっているが、そのほかは繰返し速度の影響がほとんど無い状態である。やはり、この実験範囲においては S 曲げ繰返し速度を低下させても内部損傷先行の特性は改善されないものと考えられる。

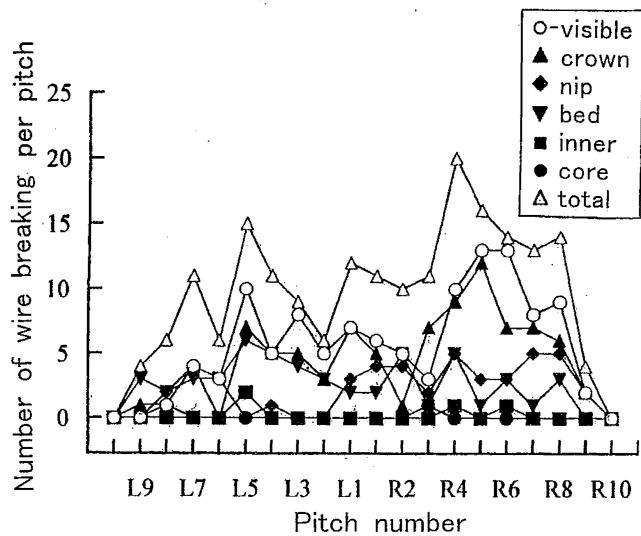


(a) IWRC 6× Fi(29) (b) IWRC 6× WS(31)
 Fig. 17 Influence of various mechanical conditions on the wire breaking distribution
 位置別視線断線数の分布状態に対する各種力学条件の影響

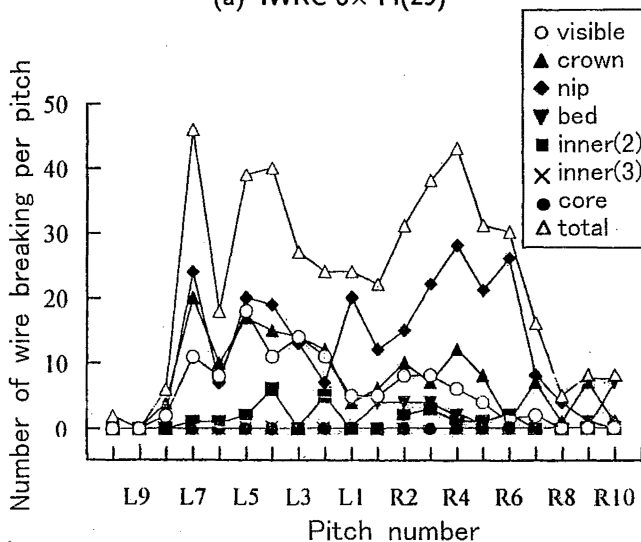
3.5 組合わせ条件の影響

ロープ張力を標準の1/2に、繰返し速度を4 cpmに落としてS曲げ疲労試験を実施した。その結果、本条件はこれらの機械的条件を単独に変更した場合より穏やかな使用条件に相当しているにもかかわらず、内部断線損傷の割合は両種ロープともむしろ大幅に増加した。その状況は、上述および次節を含めた各種力学条件の影響をまとめて、素線総断線数に対する位置別平均素線断線数の割合 R で表した Fig. 17(a) および (b) 中に併記している。

一般的には使用条件が厳しいほど内部損傷先行性が著しいと考えられていたが、そのような認識は改める必要がある。



(a) IWRC 6× Fi(29)



(b) IWRC 6× WS(31)

Fig. 18 Distribution of wire breaking numbers under U-bending test
U 曲げ条件下での位置別素線断線数分布状態の例

3.6 曲げ方式の違いの影響

以上のS曲げ疲労の標準条件と同じ D/d 、緊張力および繰返し速度の条件でU曲げ条件下での疲労試験を行った。Fig. 18(a) および (b) は可視断線数および位置別断線数の分布状態である。また、位置別断線数比 R については Fig. 17 中に併記している。これらの結果は、本条件では、標準条件に比べ両種ロープともに山部断線の割合が増加することを示している。

原因はS曲げの場合と異なりロープがシーブと接触する位置が片側表面だけに限定され、そこでの山部断線が相対的に増加するためと考えられる。ただその程度はIWRC 6× Fi(29) で顕著ではあるが、内部断線もかなりの割合を占めており、IWRC 6× WS(31) では、谷部を中心に内部断線が支配的である。しかも、ロープは使用中に回転しシーブとの接触位置が変わることが多いため、一般的には山部断線の割合は本実験の場合より減少すると考えるのが妥当であろう。すなわち、曲げ方式が変わっても結局は両種ワイヤロープの内部損傷先行特性は変わらないと判断される。

なお、負荷方式の違いとして、IWRC ワイヤロープをペンダントの様な静索として使用した場合の疲労（引張り荷重の変動する条件）については、損傷がもっぱら内部、特に心ロープとストランドの接触部（底部）で進行することが、篠原らによって確認されている⁸⁾。

3.7 断線損傷特性に対する環境条件の影響⁹⁾

両種ワイヤロープの素線断線状態に対する環境条件変更の影響を検討するため、グリース除去 (non-grease shortage)、清水滴下 (water)、および食塩水滴下 (salt water) の条件で行った実験の結果を、総素線断線数に対する位置別平均素線断線数の割合 R をとって、両種ワイヤロープに対しそれぞれ Fig. 19(a) および (b) に示す。これらの図には比較のため標準条件に対する結果を併記している。

(1) グリース除去の影響

Fig. 19(a) から、グリースが適正な状態に比べそれを除去した条件では、IWRC 6× Fi(29) の場合、底部と谷部の断線に変わりはないが、山部断線がほぼ2倍に増加しストランドの内層素線および心素線での断線にとって代わったことが分かる。また同図 (b) では、IWRC 6× WS(31) の場合、グリース除去の効果はさらに顕著で、底部断線が大幅に減少し、それに代わって山部断線が増加している。谷部の断線の比率にはほとんど変化がなかった。

ロープの種類によってこのように微妙な違いはあるが、グリース不足はこれらワイヤロープに対して、最

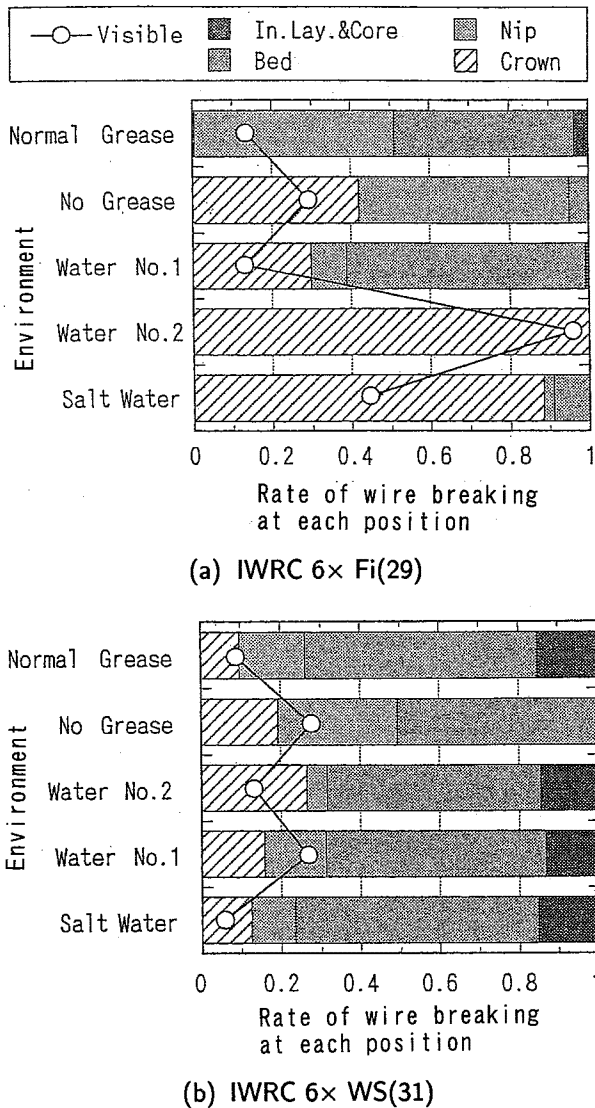


Fig. 19 Influence of environments on the distribution of wire breaking number
位置別素線断線状態に対する環境条件の影響

も断線の多い位置は変えず、山部断線を増加させる効果を有するようである。これはシーブみぞ表面とワイヤロープとの接触部での潤滑不良による摩耗促進が原因となっていると思われる。

(2) 清水滴下の影響

この環境中では、両種ロープそれぞれ2本の試験片について実験した。IWRC 6x Fi(29)の場合、二つのデータはほぼ同じで、Fig. 19(a)に示すように主な損傷である底部断線の比率は標準条件の場合とほとんど変わらない(54%)が、谷部断線の比率は減少し、その分だけ山部断線が増加している。

ところが、IWRC 6x WS(31)の場合、同図(b)に示すように、一方の試験片 No.1 は IWRC 6x Fi(29)の場合とほぼ同じ損傷状態であるのに、No. 2 ではほと

んどの断線が山部で生じている。No. 2の場合、ロープの10%断線寿命も大幅に短い。

このように同じ環境でありながら、損傷状態に大きな違いがでたのは、恐らくグリース付着状態の違いあるいは曲げ繰返しの進行に伴うロープの回転の有無(回転が無いと、特に山部断線が一定の個所で優先的に生じ易い)のためではないかと推測される。

結局、清水中では限定的な条件で山部断線が優先的に生じることがあり、内部損傷の比率のばらつきが大ききようであるが、一般的には、内部損傷が1/2を超える場合の方が多く、やはり外観検査に不都合な内部損傷先行性が存在すると言えるであろう。

(3) 食塩水滴下の影響

この環境条件では、IWRC 6x Fi(29)の場合、Fig. 19(a)に示すように、上記の清水滴下条件と同様に、山部断線の割合が増加しているがそれは極めてわずかで、主な損傷は底部および谷部の断線のままである。塩分による追加的な影響はみられない。また、IWRC 6x WS(31)の場合は同図(b)に示すように、清水中のNo.2と同じく大部分の断線が山部で生じている。

この場合の山部断線促進効果のロープ種による顕著な相違は、両者のもともとの破断寿命の大きな違いによると推定される。すなわち、鉄を溶解してき裂発生を促進する陽極腐食反応はロープ表面の山部で最も発生しやすく、寿命の違いがその反応の進行程度の差として山部断線寿命を大きく左右したと推測される。このことはIWRC 6x WS(31)でのみ山部表面の赤錆が顕著なことからも理解できる。

以上、グリース除去、清水滴下および食塩水滴下といった実際の使用条件としてはある程度許容せざるを得ないような環境的条件について断線損傷特性に対する効果を検討した。一部において内部損傷が抑制される場合はあったものの、両種ロープについてともにそのような結果を有する条件は無く、全体的に内部損傷が先行する場合の方が多い。したがって、検討したような環境的条件下でも、この種のワイヤロープには基本的には内部損傷先行性があり、やはり、そのような環境的条件の変更による内部損傷抑制策は実際には採用できないと判断される。

3.8 総括的考察

以上、実際の使用条件を含むと考えられるかなり広範囲の力学的および環境的条件のもとで、IWRC 6x Fi(29) および IWRC 6x WS(31) の2種の鋼心入りワイヤロープの損傷状態を検討したが、結局、一部を除く大半の条件で、内部損傷が先行するか、少なくとも強度低下に重要な役割を果たす割合で生じることが明

確となった。しかも本実験の範囲では両種ロープに共通して内部損傷を抑制するような条件はなかった。

このことは、検討した2種のワイヤロープには、それらが移動ロープとして繰返し曲げ条件で使用される場合、外部損傷よりも内部損傷が先行して発生、増加し易いという一般的特性があることを示している。すなわち、3.1 (1) で述べたような現在の損傷検査法における問題が、限定された条件に対してのみでなく、一般的なより大きな問題として存在することが明確となった訳である。

このような本研究の結果から判断すれば、前章で紹介した事故を含む最近の IWRC ワイヤロープの破断事故のかなりの多くは、とくに異常なあるいは不適切な使用状態によって発生したと言うよりは、この種のワイヤロープに内部損傷先行特性があるにもかかわらず、検査者を含む関係者がそれを認識していなかったことを直接原因あるいは根本的原因として、発生したと推定するのが妥当であろう。

そのような内部損傷を伴うワイヤロープ破断事故の再発防止対策については、以上本研究で明らかになった IWRC ワイヤロープの内部損傷先行特性を考慮した上で、既知の損傷検査法の活用も含め次の章で検討している。

4. 結 言

以上、最近かなりの頻度で発生したクレーン用ワイヤロープの破断事故の原因究明と同種事故の再発防止のための基礎的研究として、現在幅広く使用されている IWRC ワイヤロープについて、S 曲げを主とする疲労試験を実施し、この種のワイヤロープの内部断線損傷発生特性、それに与える各種試験条件の影響を検討した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) クレーン構造規格で許容された $D/d=16$ 、定格張力（本実験の標準）の条件だけでなく、その標準条件から D/d 、ロープ張力および曲げ繰返し速度など力学条件を幅広く変えた条件での S 曲げ疲労において、両種 IWRC ワイヤロープは外部より内部が先行する断線損傷状態を示す。
- (2) ロープグリース除去、清水滴下、および食塩水滴下の環境条件での S 曲げ疲労において、両種ワイヤロープは、一部を除く大半の条件においてやはり外部より内部が先行する断線損傷状態を示す。
- (3) 曲げ様式を変えた U 曲げ疲労においても、両種ワイヤロープとも S 曲げの場合より外部断線は多くなるが、基本的には内部断線先行性は変わらない。

- (4) 以上の結果から、検討した2種の IWRC ワイヤロープには、それらが移動ロープとして使用される場合、外部より内部で断線損傷が優先的に生じ易いという内部先行型の損傷特性があると結論できる。
- (5) このように幅広い条件下での内部損傷先行特性を有する IWRC ワイヤロープがクレーン用として多用されているにも拘わらず、その点検は内部損傷を検出出来ない外観検査に依存している現状はきわめて不安全な状態であり早急な対策が必要である。
- (6) IWRC ワイヤロープをクレーン用として使用する場合、使用条件の変更という手段で内部損傷を回避するのは実際上不可能である。したがって今後は、内部損傷の存在を想定した対応として、たとえば内部損傷であっても検出可能でしかも簡便な非破壊検査法の開発、あるいは外観検査における廃棄基準の厳格化などを検討すべきである。

参 考 文 献

- 1) 田中正清, ワイヤロープの内部損傷と問題点, Safety Engineering, 第 17 巻第 4 号 (1991) pp. 6-10.
- 2) 千田豊満, 曾我部雄次, 有光 隆, 一柳雅則, ワイヤロープ心ロープの実働下での破損, 材料, Vol. 41, No. 461 (1992) p. 239.
- 3) たとえば, 田中正清, ドッククレーンジブ落下事故調査報告書 (1989).
- 4) 田中正清, 新規ワイヤロープ試験機とそれによる IWRC ロープについての初期データ, 資源・素材, '93, ワイヤロープ資料, (1993), pp. 36-37.
- 5) 田中正清, IWRC ワイヤロープの内部損傷促進因子について, 第 1 報, D/d の影響, 資源・素材, '95, ワイヤロープ資料, (1995), pp. 36-38.
- 6) 田中正清, 近藤太二, ワイヤロープのフラクトグラフィと事故調査へのその応用, 産業安全研究所技術資料, (1979).
- 7) 田中正清, IWRC ワイヤロープの内部損傷促進因子について, 第 2 報, ロープ張力および繰返し速度の影響, 資源・素材, '96, ワイヤロープ資料, (1996), pp. 165-166.
- 8) 篠原浩一郎, クレーン用のワイヤロープの内部損耗とその検出, クレーン, 第 26 巻第 5 号 (1988) p. 18.
- 9) 田中正清, IWRC ワイヤロープの内部損傷促進因子について, 第 3 報, グリース不足および清水環境の影響, 資源・素材, '97, ワイヤロープ資料, (1997), pp. 153-155.

(平成 10 年 11 月 20 日受理)