鋼索用素線の疲労破断面について*

上 田 和 彦¹ 藤 中 雄 三²

[UDC 677.72]

Fatigue Fractured Surface of Component Wire for Steel Wire Ropes

by Kazuhiko UEDA¹ and Yuzo FUJINAKA²

Fatigue on component wire for steel wire ropes under tension and bending has been studied. This paper describes the result of fatigue test of a steel wire which bears a natural curling and discusses the result of observation of the fracture face on specimen. Relation between S-N diagram and the fracture face is also discussed.

The following items show the conclusion.

- (1) The degree of symmetry of fracture faces depend on both the residual stress and the curvature which the specimen beared before installed.
- (2) Degree of flatness on the fatigue fracture face and the shape of S-N diagram are considerably influenced by the number of crack initiation spots.
- (3) In the case installed convexly upwards with single spot initiation, the greater tensile load permit larger areas of the rapid fracture regions.

KEY WORDS: Fatigue Fractured Surface, Tension and Bending, Residual Stress, Curvature, Number of Crack Initiation Spots, Area of Rapid Fracture Region

- (1. Assoc. Prof., Maizuru College of Technology.
2. Prof., Dr., Faculty of Engineering, Kyoto University.)

1. 緒 言

動索として用いられ、滑車によって繰返し曲げを受ける鋼索を構成する素線の疲労を研究する一環として、さきにも鋼索用素線の引張曲げ疲労試験機を製作してそれによる研究結果の一部を報告した^{1)~3)}。

本研究はそれに引続いて、素線に生ずる応力と破断面の観点から素線の疲労破壊現象を解明するために、今までと同様に反りをもつ試料を使って引張片振り曲げ疲労試験を行い、反りによる影響と裂発生点の数を考慮して、S-N線図の形と破断面の形態との関係とともに疲労破断面の平滑さの程度等についての検討を行った。ここでSは設置した素線の下側表面に生ずる最大応力で、Nは破断までの繰返し数を示す。このように反りによる影響と裂発生点の数を考慮して実験結果の検討を行っているのが本研究の特色であると考えられる。

2. 実験装置および実験方法

2.1 試料

供試材は直径が異なる3種類の鋼索用硬鋼線で直径2.5mmまた

Table 1 Outline of specimen.

	I	II	III
Diameter	0.82 mm	1.25 mm	1.17 mm
C content	0.62 %	0.63 %	0.61 %
Mn content	0.70 %	—	0.42 %
Tensile strength	179 kgf/mm ²	205 kgf/mm ²	178 kgf/mm ²
Dia. of wire rod	2.5 mm	5.5 mm	—
Radius of curvature	140 ~ 160 mm	230 ~ 240 mm	1000 ~ 1400 mm
Length	365 mm	480 mm	480 mm
Effective length	200 mm	200 mm	200 mm

は5.5mmの母線から線引きされたものであり、その概要は表1に示すとおりである。

2.2 実験装置

図1は実験装置で、三相誘導電動機からVベルトと2段のプーリーを経て約300rpmでクランクを駆動しクランクアームを介して、素線に両振りまたは片振りの繰返し曲げを与えている。ロードセルによる測定の結果、実験中の引張荷重12~80kgfに対して張力の変動量は1kgf以内で、素線と装置各部の伸びによる引張応力の変動は小さく、塑性変形が無視できるものとみられる。試料の両端はチャックを介して下方のばねによる引張力が与えられ、その途中に荷重測定用のロードセルと試料破断時の自動停止装置が設けられている。繰返しの積算回数はフォトインタラプタ

* 1989年5月12日受付 9月27日受理 昭和62年9月19日、資源・素材関係学会合同秋季大会にて一部発表

1. 正会員 舞鶴工業高等専門学校校助教授 機械工学科

2. 正会員 工博 京都大学教授 工学部資源工学科

キーワード：疲労破断面，引張曲げ，残留応力，曲率，裂発生箇所数，急速破断部の面積

Fig. 1 Fatigue testing equipment for steel wire under both tension and bending.

を使った計数装置を用いてデジタル表示される。チャックは、すべりを生じずかつ質量の小さい構造とするために、3つ爪式コレット型のものを用いる。

2・3 実験方法

図1のように試料の素線の両端をそれぞれチャックによってつかみ、そのチャックを通じて有効長さが200mmの素線に引張荷重を与える。その大きさは直径が0.82mmの試料では12~40kgf、直径が1.17mmと1.25mmの試料では40~80kgfとする。実験装置を運転すると所定のたわみ量（両振り式では $\pm 3.5 \sim \pm 7$ mm、片振り式では7mmと8.5mm）がクランクによる押し下げないし押し上げ（片振り式では押し下げのみ）によって与えられる。

3. 素線に生ずる応力

素線を上に凸または下に凸となるように設置した場合、その上側表面または下側表面（以下単に「上面」または「下面」と称す）に存在する長手方向の残留応力、反りの戻り応力、引張応力および曲げ応力をそれぞれ σ_r 、 σ_c 、 σ_t および σ_b とする。ここで残留応力 σ_r は、自然状態に放置されたときに上に凸の素線の上面に存在する応力のことで、製造の過程で生ずる。反りの戻り応力 σ_c は、自然状態で反っている試料を両端から引張って真直ぐに戻していく過程で生ずる応力で、曲率半径によってその値が決まる。自然状態での曲率半径が r_N である素線を引張って、曲率半径が r になったときの反りの戻り応力 σ_c は $\sigma_c = E\gamma(1/r_N - 1/r)$ となる。ここで E は素線の縦弾性係数で γ は素線の半径を示す。したがって自然状態（ $r = r_N$ ）における反りの戻り応力は0で、素線を強く引張ったときのそれはほぼ $E\gamma/r_N$ となる。曲げ応力 σ_b は、試料中央部を押込んで曲げることに生ずる垂直応力で、押込み量によって変動し1周期中の応力振幅は図2と図3に示すとおりである。外力が加わらないときは上に凸の素線の上面に $+\sigma_r$ 、また下面に $-\sigma_r$ の残留応力が存在するので、下に凸の素線であればその上面に $-\sigma_r$ そして下面には $+\sigma_r$ の残留応力が存在する¹⁾。ここでは符号の+は引張を、-は圧縮を示す。引張片振り曲げと引張両振り曲げによる素線の上端と下端の応力変動の状況、特に本稿で重要な働きをしている残留応力と反りの戻り応力の影響を具体的に図で示すと、図2²⁾と図3³⁾のように表される。

4. 実験結果および考察

4・1 引張両振り曲げ疲労試験結果

Fig. 2 Stress on component steel wire under tension and pulsating bending.

Fig. 3 Stress on component steel wire installed convexly upwards under tension and alternating bending.

本報記載の写真はすべて走査電子顕微鏡によるもので、直径が0.82mmの試料の場合、観察したほとんどすべての破面は図4に示すように上下対称に近い典型的な両振り破面を示していた。この場合は $\sigma_c \cong \sigma_r$ の関係から、図3に示すように素線の上面と下面に交互に最大応力を生じ、ほぼ同時に上下両面から中心軸に向かってき裂が進行して最後に中央部で急速破断するようである。

直径が1.25mmの試料の場合には、両振りであっても観察したほとんどすべての破面は図5に示すように極端な上下非対称性を示していた。これは直径が1.25mmのときは、直径が0.82mmの試料との破面の明確な違いから、試料の上面と下面の最大応力の差 $\{2(\sigma_c - \sigma_r)\}$ が0ではなくて30~35kgf/mm²の値をもち、最大応力の大きい側からき裂が先に進展して上下の一方に片寄ったものと考えられる。

実用上の素線では、最大応力が小さくなる関係上両者の応力差がほぼ0に近い両振り破断面が表れた方がよい。反りの戻り応力 σ_c は前述のように引張荷重によって決まるが、ある程度以上の

Fig. 4 Fracture face resulted from tension and alternating bending. (ϕ 0.82, Symmetry)

Fig. 5 Fracture face resulted from tension and alternating bending.
(ϕ 1.25, Unsymmetry)

Fig. 6 S-N diagram of a wire of diameter 1.25 mm installed convexly upwards under tension and pulsating bending obtained by depressions of 7 mm. (Maximum stress is the value after correction.)

荷重をかければほぼ一定となり、残留応力 σ_r も使用中ではほぼ一定とみられるので、使い方によって良好な破断面が現れるようにするのは難しいと考えられる。

4・2 引張片振り曲げ疲労試験結果

引張片振り曲げ疲労試験結果として、押込み深さが同じで上に凸と下に凸に設定した素線についてそれぞれS-N線図を描いて、両線図の疲労限度がほぼ同じになるように $\Delta\sigma=2(\sigma_c-\sigma_r)$ の値を決めて最大応力の補正を行うが、¹⁾図6と図7にその一例を示す。上に凸に設定した直径が1.17 mmの試料のS-N線図として図8に示す。引張片振り疲労破断面を図9から図14に示す。

上に凸に設置した場合（以下では「上に凸」と称す）で直径が1.25 mmの試料について、全横断面に占める最終破断面の面積割合を目測で求めると、引張荷重が40 kgfで25～30%、50 kgfで25～50%、60 kgfで45～70%、70 kgfで40～50%、80 kgfで45～50%（場合により70%）となっている。引張荷重が60 kgf位までは、あまり明確ではないが荷重が増加するにつれて、横断面における最終破断面の面積割合は増加している。一般に疲労によるき裂が進展して素線の断面積が減少し、最後に応力に耐えきれなくなって破断する。この場合、押込み荷重による曲げ応力の増加は疲労寿命に影響を与えるとともに破断の引き金の作用をし、実験中常時作用している引張応力が大きいほど大きな未疲労部分が最後に急速破断するなど、最終破断が主として引張荷重に影響され

Fig. 7 S-N diagram of a wire of diameter 1.25 mm installed convexly downwards under tension and pulsating bending obtained by depressions of 7 mm. (Maximum stress is the value after correction.)

Fig. 8 S-N diagram of a wire of diameter 1.17 mm installed convexly upwards under tension and pulsating bending obtained by depressions of 8.5 mm. (Maximum stress is the value before correction.)

るために引張荷重と最終破断面の面積割合が比例的になると考えられる。荷重が40 kgfでは図9のように破断部に段付は認められないが、荷重が60 kgf以上で大きくなるほど図10と図11のようにき裂発生点が2つの場合が多くなり、疲労破断部が2つ以上に分れた破面となるなど横断面の形態も複雑となる。その理由として、引張荷重が大きくなると引張応力とともに押込みによる曲げ応力も大きくなり、素線の位置による応力差よりも表面の微小欠陥による応力集中の影響が大きくなって、素線の下端から少しずつ複数の微小欠陥からき裂が発生しやすくなるためと考えられる。図12の破面はき裂発生点が2つの場合の変型と変えられる。荷重が40～60 kgfの範囲では、S-N線図上のデータがほぼ直線的に変化して、最大応力が増加するとともに破断までの繰返し数が減少しているが、これはほぼき裂発生点が1つの場合に対応している。

同様にして上に凸で直径が1.17 mmの試料について、全横断面に占める最終破断面の面積割合を目測で求めると、引張荷重が40 kgfで30～40%、60 kgfで45～50%、80 kgfで55～60%となっていて、引張荷重とともに増大している。この場合、疲労破断の後半というか最後にしばしば大きなき裂が認められるが、疲労

Fig. 9 Fracture face resulted from tension and pulsating bending. (ϕ 1.25, Convexly upwards, Tensile load: 40 kgf)

Fig. 10 Fracture face resulted from tension and pulsating bending. (ϕ 1.25, Convexly upwards, Tensile load: 70 kgf)

Fig. 11 Fracture face resulted from tension and pulsating bending. (ϕ 1.25, Convexly upwards, Tensile load: 80 kgf)

Fig. 12 Fracture face resulted from tension and pulsating bending. (ϕ 1.25, Convexly upwards, Tensile load: 80 kgf)

Fig. 13 Fracture face resulted from tension and pulsating bending. (ϕ 1.17, Convexly upwards, Tensile load: 60 kgf)

Fig. 14 Fracture face resulted from tension and pulsating bending. (ϕ 1.25, Convexly downwards, Tensile load: 80 kgf)

破面はほぼ平面である。荷重が40~80kgfの全範囲にわたって、き裂の発生点は1つでS-N線図上のデータがほぼ直線的に変化している。

直径が1.25mmの試料と比べて直径が1.17mmの試料の方が粘りがあり、この違いによって引張荷重が大きい場合に硬くてもろい材料ほど微小欠陥による応力集中の影響を受けやすいため、破断形態の違いが表れたものと考えられる。図13のように疲労破断部と最終破断部の境界が円弧状になっているのは、貝殻模様は認められなくても、き裂が1つの発生点からほぼ同心円状に進展した結果と考えられる。

下に凸に設置した場合（以下「下に凸」と称す）が直径が1.25mmの試料については、得られた破断面からき裂発生点が1つであることを示している。疲労破断部には、図14のように大きなき裂が見られる場合はあるが、破面はほぼ均一な平面である。荷重が60~80kgfでは、全横断面に占める最終破断部の割合は40~50%であるが、最終破断部の面積と引張荷重の間にはほとんど相関関係は認められない。下に凸の場合のように破断形態が一様な範囲では、S-N線図は上に凸で荷重が40~60kgfの場合と同様の

変化をしている。

直径が1.17mmの試料で下に凸の場合は、上に凸の場合に比べて最大応力が小さく緩い条件での試験となるので、き裂の発生点は1つで疲労破面は平滑である。

4・3 ミクロおよびマクロ破面

ミクロ的には疲労破断部に硬鋼に特有の不規則なき裂がみられ、疲労特有のストライエーションまたはそれに類する模様は認められない。また最終破断部に急速破断面に特有のディンプルが認められる⁴⁾。

引張片振り曲げ疲労によって破断した硬鋼線のマクロ形態は、き裂発生点が1つの場合にはほぼ丸棒を軸方向に直角に切断した形になるが、時にはき裂発生点が2つで段のついた破断形態が認められた。後者の場合、破断部を模式的に描くと図15のように表わされ、試料の長手方向に少し間隔が離れた2つのき裂の発生点CからFのように疲労き裂が別個に進展して、引張荷重に耐えられなくなって破断時にR1, R2の順でき裂が合体したものと考えられる。前述の図10と図11の破断面は図15(3)の場合に相当し、実験した範囲では同図(2)の場合は認められなかった。このように

Fig. 15 Model of fracture faces bearing two spots of crack initiation.

き裂は必ずしも上下両面から発生するとは限らないようである。

5. 結 言

いままでに述べた実験と考察の結果、得られた結論はつぎのとおりである。

1) 素線の取付け姿勢を反りの方向と一致させた両振り試験において、反りの戻り応力と残留応力の差が0またはほとんど0に

近い場合に典型的な対称形を示す両振り破断面となり、両者の応力差が大きいほど破断面の非対称性が大きくなると考えられ、その差が例えば 15 kgf/mm^2 の場合には著しく非対称な破断面となる。実用上の素線では、最大応力が小さくなる関係上両者の応力差がほぼ0に近い両振り破断面が現れた方がよいが、意図的にそのような使い方をするのは困難である。

2) 片振りの場合、き裂の発生点が1つか2つによって疲労破断面部が平滑であるか粗面になるかが決まり、S-N線図にも違いが表れる。硬くてもろい硬鋼線で引張荷重を大きくした場合にき裂の発生点が実験になることが多く、破断面の形態も複雑となる。き裂の発生点は1つの方が、S-N線図が規則的で疲労寿命が予測しやすいので良い。実用上では硬鋼線のうちでも特に硬くてもろく引張強さが 200 kgf/mm^2 程度以上の場合、例えば本実験における破断強さの25%程度以下のように、引張荷重を相当低くおさえて使用するのが望ましいと言える。

3) 上に凸になる形で試料を設置して片振り試験を行ったとき、き裂の発生点が1つで疲労破断面部が平滑である場合に、引張荷重の大きさと最終破断面の面積が全横断面に占める割合は比例的である。この場合、最終破断においては引張荷重が主要な働きをしているので、最終破断部の面積より稼働中の引張荷重を推定することができる。

おわりに、本研究に用いた試料の素線を提供していただいた神鋼鋼線工業(株)ならびに東京製鋼(株)に謝意を表するとともに、実験装置の製作等にあたってご援助いただいた舞鶴高専機械工学科の小倉係長をはじめ技官の方々および当時卒研究生であった伊庭道夫、森本弘毅の両君をはじめとする諸氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 上田和彦・藤中雄三：水曜会誌，20 [1]，109～112，(1983)
- 2) 上田和彦・藤中雄三：水曜会誌，20 [3]，223～227，(1984)
- 3) 藤中雄三・上田和彦：日本鉱業会誌，102 [1181]，401～405，(1986)
- 4) たたとえば小寺沢良一：鉄と鋼，70 [8]，803～814，(1984)