鋼索用素線の引張片振り曲げ疲労試験における 亀裂の発生と進展について*

上 田 和 彦¹ 藤 中 雄 三²

[UDC 620.178.3:622.673]

Crack Initiation and Growth in Fatigue Test of Curved Steel Wire under Both Tension and Pulsating Bending

by Kazuhiko UEDA¹ and Yuzo FUJINAKA²

1. Maizuru College of Technology, Maizuru 625

2. Faculty of Engineering, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606

This paper reports on an acoustic emission method and a DC electric potential method, as the measure for evaluating the progression of cracks during the fatigue test, of curved steel wires under both tension and pulsating bending.

The cumulative count of the AE event and the electric potential ratio (potential/initial potential) those increase with growing of a crack are shown. Considering the relation between electric potential ratio and relative crack depth, the initiation and growing of a crack are also investigated.

The results are as follows.

- (1) Crack initiation happens at about 40% of total lifetime.
- (2) Crack grows rapidly in the last several minutes before failure.
- (3) Increment $((v-v_0)/v_0)$ of electric potential ratio $(v/v_0, v_0: \text{initial value})$ is approximately proportional to the three-halves power of the area of the fatigue fractured region in a specimen.

KEY WORDS: Tension and Pulsating Bending, Crack Initiation and Growth, Cumulative Count of AE Event, Electric Potential Ratio, Relative Crack Depth, Area of Fatigue Fractured Region

1. 緒 言

鋼索の疲労を検討するにあたり、それを構成している素線の疲労特性を知るとともに疲労破壊現象を解明するために、硬鋼線の引張曲げ疲労試験を行い、S-N線図の作成によって素線の反りが試験中の素線応力におよぼす影響と疲労破壊によって生じた破断面の検討を行ってきた¹⁾²⁾。

本研究はそれに引続いて素線の疲労破壊の進行状況を解明するために、アコースティック・エミッション法(以下「AE法」と称する)³⁾によって破壊の微視的な過程に対応して発生した突発型の弾性波(超音波)を、1チャンネルの必要最小限度の装置のためイベント計数法によって電圧パルス信号に変えてAE累積総数を測定すると同時に、別に直流電位差法(以下「電位差法」と称する)⁴⁾によって試料に一定電流を通してるとき破壊にともなって生じたき裂による抵抗の変化を電圧の変化として測定することにより、き裂の発生時期とき裂の進展状況についての検討を行った。

2. 実験装置および実験方法

2・1 試料

* 1989年11月6日受付 1990年4月18日受理 昭和63年度資源・素材関係学協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(現 福井工業大学)
キーワード: 引張片振り曲げ, き裂の発生と進展, AE事象総数, 電気ポテンシャル比(電位差比), 相対き裂深さ, 疲労破断面の面積

供試材は直径1.17mm, 炭素量0.61%, マンガン量0.42%, けい素量0.22%, 表面のマイクロビッカース硬度418, 引張強さ177.7 kgf/mm²の鋼索用硬鋼線である。自然状態で曲率半径1,100~1,500mmの反りがみられる。本研究ではこれを長さ480mmに切断し有効長さ200mmの試料として用いた。

2・2 実験装置

図1は素線の引張曲げ疲労試験機で、試料の素線に約300cpm

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

Fig. 2 Chucking of a sample and attaching of an AE transducer.

Fig. 3 Schematic diagram of the measurement system.

の片振りの繰返し曲げを与える。素線の引張荷重の測定には4ゲージ式の軽量ロードセルを使用した¹⁾。

図2と図3はそれぞれ試料取付部と計測装置の概要を示したもので、電位差法では試料に通電するため試料と疲労試験機本体とは電気的に絶縁することが必要である。そのため試料支持器とクラック・ローラにはそれぞれセラミックボール軸受と表面にセラミックのコーティングが施された軸受を使用し、チャック継手と引張用ロープ先端部の嵌合い部分にはフッ素樹脂系の滑り軸受を使用した。電位差の測定には分解能が $1\mu\text{V}$ のデジタルマルチメータを使用する。

A E法では直径70mm、厚さ2mmの鋼製の円板をチャック前面にビス止めて、それにグリスを塗って取付金具でA Eセンサを圧着する。A Eセンサは差動型を使用し、前置増幅器の増幅度は40dBで、振幅弁別器は原波形をパルスに変換するのに高レベルと低レベルの2つのしきい値をもった2弁別レベル方式を採用した。A E波形の観察用にはオシロスコープを用いる。

図4は探触子の平行移動装置で、ばねを使って2本の探触子を一定の圧力で人工切欠き部分を間にはさんで試料に押しつけながら、試料に平行に移動して2探触子間の電位差を測定する機構となっている。

2・3 実験方法

図2のように2つのチャックで試料の素線を固定した後40kgfと60kgfおよび80kgfの引張荷重を与える。疲労試験機を運転すると所定のたわみ量(1+8.5mm)がクラックの押し下げによって与えられる。試料とクラック・ローラが常に離れないようにするために、クラックが最も高い位置にあるときでも1mmの押し下げ量を与えるようにしてある。本研究では引張・片振り曲げ・疲労試験機として使用する。

電位差法では、クラック・ローラをはさんでおよそ17mmの間隔で試料の下面にスポット溶接した細いリード線を電位差計に導くようにしたあと、実験中の試料には定電流電源からの直流0.6Aを通電して、2本のリード線間の電位差を一定時間(例えば、

Fig. 4 Device for moving probe parallel to a sample.

Fig. 5 Changing with time of both cumulative count of AE event and electric potential ratio (v/v_0 , i.e. potential/initial potential).

始めは1分おきすなわち約300回ごとで、破断が近づくとき10秒おきすなわち約50回ごと)おきに測定する。ここで電流値0.6Aは、長時間連続的に試料に通電したときほとんど温度上昇を生じないほぼ最大の値である。試料にあらかじめ種々の切欠きをつけたものを準備して、疲労試験時と同じ電流を流して探触子の平行移動装置を使って、切欠きの深さと電位差の変化すなわち電気抵抗の変化との関係を求めるようにした。

A E法では振幅弁別器の増幅度を40dBに設定し、電気的および機械的雑音を低減するためにローパスフィルタを1MHz、ハイパスフィルタを100KHzに設定した。

3. 実験結果および考察

図5は繰返し曲げ回数の増加に伴う電位差比とA E累積数の変化状況を示すもので、試験後期の破壊の直前の変化をよくとらえることができている。ここで電位差比は「2本のリード線間の電位差 V のその初期値 V_0 に対する比率」である。

A E信号は比較的小さく電気的機械的雑音の影響を受けやすく実験のたびにかなり大きく値が変りがちであるが、本実験では多くの場合、図5のA E累積曲線Aに示されているようにき裂の進展が早くなって電位差が増加し始めた時期にあわせてA E累積数の勾配すなわちA E発生率が急激に大きくなっている。ときには同図中のA E累積曲線Bが示すように急な立上りの見られない場合もあった。一般にA Eには連続型と突発型の2種類があって、突発型は破壊の微視的な過程すなわち微小な割れの進行に対応してひずみエネルギーが解放されるとき生ずるため、塑性変形と

もに生ずる連続型に比べてエネルギーレベル(従って信号レベル)が高い。先に述べたように本実験では信号レベルが大きく断続的に発生する突発型のA Eを扱う関係上、A E信号の発生頻度という物理的意味から妥当なカウント方式であることおよび1チャンネルの必要最小限度の装置を使用しているためイベント計数法を採用し、不感時間を零としている。リングダウン計数法は一定のしきい値を越えた弾性波のサイクル数を全部数える振幅による一種の重みづけ計数法であるが、ここではイベント計数法なのでA Eの数と信号レベルとは直接の関係はなく、破断の直前でA Eの発生が多くなりA Eの数が増加するものと考えられる。波形観察によって本実験の場合はすべて突発型であることが認められ、A E累積曲線の両者の場合とも全寿命の40%の頃からA Eが出現し、ここがはばき裂の発生時期と考えられる。

本実験では、き裂深さが直径の10%近く達してから電位差法によるき裂の検出が可能で、検出時期は繰返し数で測って破断の2,000~3,000回までである。これは時間にして7~10分前に相当している。電位差比曲線は図5に示されているような形となっていて、破断直前では繰返し数に対して指数関数的に急激に増加している。全寿命の残り1/6~1/10の時期からき裂が急速に進展したことが分かり、本実験の疲労破壊の特性を典型的に表しているものと認められる。破壊の直前までの測定値が十分安定で雑音性障害も少ないので、この方法はき裂の計測のためにすぐれた方法であると認められる。

オシロスコープによる観察結果ではA E波形の振幅は、始めは雑音レベルよりもわずかに大きい程度であるが、しだいに大きくなり破断直前には少なくとも数倍から10倍程度にはなっていることが認められた。

き裂深さと電位差の関係を知る較正は、試料に種々の深さの人工切欠きをつけ、探触子の平行移動装置を用いて行うことは前に述べたが、切欠き深さと電位差の増加分すなわち抵抗の増加分との関係として示すと図6のようになる。同図から切欠き深さと抵抗の増加率との関係が分かり、相対切欠き深さがおよそ0.28を境にして増加率が2倍ほど大きくなっている。切欠き深さとその部分の断面積の減少量とは一定の関係があるので、図6を抵抗の増加分すなわち電位差比の増加分(X とする)と断面積の減少量(その相対値を Y とする)の関係に置き換え、 X と Y の関係を両対数グラフに表して最小2乗法によって直線の近似式を求めた後、通常のグラフの関係に戻すと $X=0.092Y^{1.29}$ の関係式が得られる。

Fig. 6 Relation between electric potential ratio (v/v_0 , i.e. potential/initial potential) and relative notch depth (H/D , i.e. depth/diameter).

Fig. 7 Changing with time of electric potential ratio (v/v_0 , i.e. potential/initial potential) before failure.

この式は特に Y がおおよそ0.35より大きい場合に実測値との誤差が大きくなるので、実測値のバラツキが相対的に小さく信頼度が高い Y がおおよそ0.3より大きい範囲で、誤差が小さくなるように修正すると $X \cong 0.12Y^{1.5}$ の関係式が得られる。言い換えると切欠きによる抵抗の増加分すなわち電位差の増加分は、切欠部の断面積の減少量すなわち疲労破断部の面積の3/2乗にはば比例して増加している。ここで仮りに交流を用いると異なった状況を呈するものと思われるので、今後は交流法についても検討を行い周波数がある程度高めることによって、相対き裂深さが0.1前後以下の表面の損傷に対する検出能が高められることが期待される。また、0.6 A以上の直流の断続電流を流して試料の温度上昇をおさえながら検出能を高める方法も検討している。

図7は、図5に示したものと同様の電位差比曲線における試験後期部分について拡大して示したものである。引張荷重が80 kgfのときも図7の3曲線と同様に電位差比曲線は破断直前に指数関数的に増大している。図6と図7より破断直前の電位差比から破断時のき裂深さ従って疲労破断部の面積割合が推定できる。

図6と図7の関係を総合すると、破断前のき裂深さの進行状況を示した図8が得られる。き裂は始めはゆるやかであるが後にはかなり早く進行し、引張荷重が40 kgfないし60 kgf(引張応力が37 kgf/mm²ないし56 kgf/mm²)のときは相対き裂深さが0.5~0.6に達すると実験的に破断する。同様に引張荷重が80 kgf(引張応力が74 kgf/mm²)のときは相対き裂深さが0.4~0.43位で破断する。

図8の曲線の勾配を求めると図9に示した平均の巨視的疲労き裂伝ば速度の図が得られる。相対き裂深さが0.1付近のときの伝ば速度はおおよそ 10^{-4} mm/cycleである。破断直前のそれは 10^{-3} mm/cycleで1桁の違いがある。き裂が進展する途中の相対き裂深さが0.28付近で、伝ば速度が一様に増加せず低下しているのが認められる。その原因として、相対き裂深さが0.28付近を越えると、同一電位差比の増加分に対する相対き裂深さの増加分が小

Fig. 8 Growth of crack depth.

Fig. 9 Changing with time of average macroscopic crack growth rate before failure.

さくなっていることおよび観測データのバラツキに起因していると考えられる。

図5においてA E信号が検出され始めた時期をき裂の発生時期とみなすと、本電位差法によってき裂を検出し始める時期(このときの相対き裂深さは小さく見積って0.05とする)に比べて時間差はおおよそ20分程度である。この間の平均の巨視的疲労き裂伝ば速度はおおよそ 10^{-5} mm/cycleとなり、きわめて遅いき裂の進展であることが分かる。

図10はき裂発生点が2つで疲労破面が一樣でない場合の一例を示し、図11はき裂発生点が1つで疲労破面が一樣な場合の典型的な例を示し、本報における破断面はすべて後者の場合に該当している。図11上で右端のき裂発生点から破面の中心部に向かって半径の5分の1の位置(相対深さ: 0.1)における疲労破面を図12に示す。図12の疲労破面におけるき裂の進行方向は右から左で、この破面の不規則なミクロ組織は試料の表面付近から中心部に向かってほとんど同じであるが、中心部付近では大きなき裂が認められる。図12を詳細に観察すると右上部に縞模様は認められ、その間隔はおおよそ $0.2\mu\text{m}$ すなわち 2×10^{-4} mmで、電位差法で求めたき裂進展速度とほぼ一致するので、この縞模様はストライエーションとみられ疲労破面上のごく一部に散在しているものと考えられる。

実験結果より得られた巨視的疲労き裂伝ば速度は、鋼について知られている通常の値⁵⁾とほぼ一致している。A E法および電位差法とも破断前にそれぞれ累積総数および電位差比の値が大きくなり、破断が近づいたことが分かり破断の予知を直前に行うことが可能である。

4. 結 言

本研究の実験と考察の結果、得られた結論は次のとおりである。

- 1) き裂の発生時期は全寿命のおおよそ4割位のときで、電位差法による検出開始時期に比べてかなり早い。き裂の発生時期の計測にはA E法が、またき裂伝ばの比較的速い中期以降のき裂深さの計測には電位差法が適している。き裂が急速に進展し始める比較的初期の段階で相対き裂深さがおおよそ0.1以下の場合には、直流法では計測が困難なので、今後表面き裂に対する検出能が高い交流法等を検討する必要がある。
- 2) 電位差法によるき裂の検出開始時期は破断前の2,000～

Fig. 10 Fracture face resulting from tension and pulsating bending. ($\phi 1.25$, convexly upwards, tensile load: 80 kgf) Fig. 11 Fracture face resulting from tension and pulsating bending. ($\phi 1.17$, convexly upwards, tensile load: 60 kgf)

Fig. 12 Irregular fracture face in the fatigue fracture region. Relative crack depth is 0.1. Arrows bracket striations.

3,000回で全寿命の残り1/6~1/10に相当し、破壊はその後短時間のうちに急速に進展する。素線の疲労試験開始後、疲労破壊が急速に進展し始めるまでの時間は全寿命の5/6~9/10位なので、素線を引張繰返し曲げを受ける部分に使用する場合、破断する前に取替えるまでの安全な使用時間が大きく（例えば全寿命の1/2など）とれるので有効な使い方ができる。

3) 相対切欠き深さが0.1程度以下の小さい場合は抵抗の変化すなわち電位差比の変化もほとんど認められないが、それ以上では切欠き深さとともに電位差比が徐々に増大し始めて、切欠きによる抵抗の変化分は切欠き部の断面積の減少量すなわち疲労破断部の面積の3/2乗にほぼ比例して増大する。

本研究に用いた試料の素線を提供していただいた東京製鋼(株)

に謝意を表するとともに、セラミックボール軸受およびセラミックコーティング軸受の使用に便宜をはかっていただいた日本ビロブロック製造(株)に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 藤中雄三・上田和彦：日本鉱業会誌，102〔1181〕，401~405，（1986）
- 2) 上田和彦：昭和62年度資源・素材関係学協会合同秋季大会分科研究会（ワイヤロープ）資料，16~19，（1987）
- 3) 仲佐博裕・尾上守夫：材料科学，13〔1・2〕，29~45，（1976）
- 4) 矢川元基・福田俊彦：機械の研究，35〔11〕，29~31，（1983）
- 5) たとえば北川英夫，小寺沢良一：フラクトグラフィ，103~108，（1977），培風館（東京）

新刊紹介

日本機械学会編

“先端複合材料”

技報堂出版 1990 < A5・279頁・4,635円 >

本書は、斯界の第一線の方々に執筆を願い、できるだけ平易にACM（先端複合材料）の最新技術についてその概要を網羅し、機械関係の研究者、技術者、経営者方にその全体像を把握し、応用開発に資するような配慮のもとに編纂した。（序より抜粋）

目 次

- 第1章 複合材料の沿革と先端材料
- 第2章 高性能繊維とマトリックス
- 第3章 エンジニアリングプラスチック
- 第4章 プラスチック基先端複合材料の物性
- 第5章 プラスチック基先端複合材料の力学
- 第6章 プラスチック基先端複合材料の設計の最適化
- 第7章 プラスチック基先端複合材料の成形法

- 第8章 熱可塑性樹脂系複合材料の特性と成形加工法
- 第9章 金属基複合材料の成形法と特性
- 第10章 繊維強化セラミックスの特性と応用
- 第11章 C/Cコンポジットの特性と応用
- 第12章 エラストマー系複合材料の特性と応用
- 第13章 3次元織物の開発と応用
- 第14章 機能性複合材料の特性と応用
- 第15章 複合材料の破壊力学的評価法
- 第16章 先端複合材料の非破壊検査法
- 第17章 先端複合材料の二次加工
- 第18章 先端複合材料の応用と可能性

技報堂出版(株)：03(585)0166