炭素鋼におけるすべり線発生現象を 利用した疲労き裂の挙動の検討*

北 岡 征 一 郎** 清 家 政 一 郎**

Examination of Behaviour of Fatigue Cracks in Carbon Steel Using Slip-initiation Phenomenon

by

Seichirō KITAOKA and Masaichiro SEIKA

(Faculty of Engineering, Nagoya University, Nagoya)

In order to examine the behaviour of fatigue cracks in carbon steel subjected to rotary bending and cyclic torsion, both the technique utilizing slip-initiation phenomenon in the material and the copper electroplating method of stress analysis are applied. Based on the above results, the fatigue-notch factor of cracked specimens is compared with the stress-concentration factor at crack tip. It is found that more accurate results can be obtained by the slip-initiation technique than by the electroplating method, if the measuring region at the crack tip is identical. The change in metal properties caused by the formation of fatigue cracks has no effect on the crack propagating stress in pure iron, but it affects notably the crack propagating stress in eutectoid steel.

(Received Feb. 12, 1976)

1 緒 言

材料に発生した疲労き裂の進展は、見掛け上は作用する繰返し公称応力の大きさに支配されていても、実際にはき裂先端近傍に生ずる応力またはひずみの大きさおよびその状態と、き裂先端部における材料の疲労強度との相互関係によって決まるものと考えられる。したがって、き裂を有する材料の疲労挙動を解明する場合には、き裂先端近傍の微視的領域に加わる応力またはひずみの状態を直接調査することが必要である。

従来、き裂先端部の応力やひずみは、グリッド法¹⁾、細束X線法²⁾、モアレ法³⁾、銅めっき法⁴⁾などを利用して測定され、き裂の進展挙動との関連が検討されてきた。しかし、繰返し荷重下において、き裂先端部近傍の微小領域に集中する応力やひずみを精度よく測定することは、必ずしも容易ではないようである。

本報告では、疲労の過程で材料に発生するすべり線を利用して、繰返し応力を受けるき裂先端近傍の応力集中の状態を評価する方法を提案し、回転曲げおよび繰返しねじりの場合に適用した結果を銅めっき法による結果と比較して、本方法が疲労き裂の挙動を検討す

る場合に有効な手法となりうることを明らかにした。

2 すべり線の利用によるき裂先端部の応力集中率の測定

材料の疲労によるすべり線は、一般に疲労限度よりもかなり低い繰返し応力の作用によって、最もすべりやすい方位および大きさをもつ結晶粒にまず発生する。また、すべり線の発生は主として繰返し最大せん断応力に支配され、この応力が材料に固有なある限界値に達したときに初めて発生することが知られている⁵⁾。これは、銅めっき応力測定法におけるめっき層の成長粒子の発生が、ある定まった繰返し数に対して地金表面に生ずる繰返し最大せん断ひずみの大きさに支配されることと類似の現象といえる。き裂先端部のすべり線発生限界応力は、応力集中の程度に応じて異なるが、平滑材のすべり線発生限界応力よりも低い値となることは確かである。そこで、一定の応力繰返し数のもとで平滑材とき裂先端部のすべり線発生限界応力を比較すれば、先端部の応力集中率を求めることが可能である。ただし、き裂先端部の結晶粒は必ずしもすべりやすい方位および大きさをもつとは限らない。したがって、多数のき裂に対して限界応力を求めるようにすれば、測定精度を高めることができるものと考えられる。

* 原稿受理 昭和51年2月12日

** 正会員 名古屋大学工学部 名古屋市千種区不老町

以上の考察に基づき、き裂先端部の応力集中度 α としては、処女平滑材のすべり線発生限界応力 (σ_s, τ_s) に対するき裂先端部のすべり線発生限界応力 (σ_{cs}, τ_{cs}) の比をとり、回転曲げに対しては $\alpha = \sigma_s / \sigma_{cs}$ 、繰返しねじりにに対しては $\alpha = \tau_s / \tau_{cs}$ とした。

3 実 験 方 法

3・1 試験片および試験機

供試素材は純鉄および共析鋼の引抜き丸棒で、化学成分を Table I に、機械的性質および熱処理条件を Table II に示した。所定の熱処理を施した後、Fig. 1 に示した形状・寸法の試験片に加工した。試験片中央の平行部分は紙やすりで #320 まで仕上げ、加工による硬化層を除去するため、純鉄に対しては 600℃、共析鋼に対しては 640℃でそれぞれ1時間保持の真空

Fig. 1. Fatigue test specimens.

焼なましを施した後、氷酢酸と過塩素酸の容積比が10 : 1 の電解液を用いて鏡面仕上を行なった。Fig. 2 には材料の組織写真を示した。純鉄および共析鋼の平均結晶粒径はそれぞれ 0.04 mm, 0.015 mm である。なお使用した試験機は回転曲げには小野式疲れ試験機、繰返しねじりにはシェンク式疲れ試験機(ともに 3 600 rpm) である。

3・2 実験方法

まず、曲げおよびねじりに対する S-N 曲線を求めて疲労限度 (σ_w, τ_w) を定めるとともに、繰返し数 10^7 におけるすべり線発生限界応力 (σ_s, τ_s) を求め

Table I. Chemical composition (%).

	C	S	Mn	Si	P
Pure iron	0.008	0.010	0.060	—	—
Eutectoid steel	0.85	0.007	0.36	0.19	0.019

Table II. Mechanical properties and heat treatment.

Young's modulus	(kg/mm ²)	2.14×10 ⁴	2.11×10 ⁴
Modulus of rigidity	(kg/mm ²)	8.23×10 ³	8.17×10 ³
Upper yield point (in tension)	(kg/mm ²)	27.7	32.2
Lower yield point (in tension)	(kg/mm ²)	19.5	30.8
Upper yield point (in torsion)	(kg/mm ²)	14.0	—
Lower yield point (in torsion)	(kg/mm ²)	10.6	—
Tensile strength	(kg/mm ²)	30.3	63.6
Breaking stress	(kg/mm ²)	12.2	47.0
Elongation	(%)	40.0	25.6
Reduction of area	(%)	85	40
Mean grain diameter	(mm ²)	0.04	0.015
Heat treatment		Water-quenching after heating at 980℃ for one hour and tempering after heating at 500℃ for two hours	Annealing at 800℃ for one hour

(a) Pure iron (b) Eutectoid steel

Fig. 2. Microscopic structure of the material.

Fig. 3. Precracks at stresses higher than the fatigue limits.
(Arrow indicates the specimen axis.)

た。つぎに、曲げおよびねじりの過大応力 (σ_H , τ_H) で疲労試験を実施して、各種の長さのき裂を作り、その形状を明確にするため、試験片表面を電解研磨により数 μ 除去した(き裂試験片)。さらにき裂作製時に生じた疲労による硬化層を除去するため、き裂試験片に前述と同じ真空焼なましを施した試験片(焼なましき裂試験片)を用意した。これらの試験片に対して、き裂長さ l と進展限界応力 (σ_e , τ_e) の関係を求めるとともに、き裂先端部の応力集中の度合をすべり線発生現象および銅めっき法を用いて測定し、き裂先端近傍の応力集中とき裂進展との関連について検討を加えた。

4 実験結果および考察

4・1 過大応力におけるき裂の発生状態

過大応力で発生したき裂の一例を Fig. 3 に示した。本実験で取り扱ったき裂長さの範囲では、曲げに対するき裂は純鉄、共析鋼のいずれにおいても引張型であり、ねじりに対しては純鉄においてせん断型、共析鋼においては $l \geq 0.3$ mm では引張型とみなすことができた。また、純鉄に対しては、 $\sigma_w = 15.7 \text{ kg/mm}^2$, $\tau_w = 9.9 \text{ kg/mm}^2$; $\sigma_s = 12.0 \text{ kg/mm}^2$, $\tau_s = 6.5 \text{ kg/mm}^2$ となり、 $\sigma_H = 17.7 \text{ kg/mm}^2$, $\tau_H = 10.5 \text{ kg/mm}^2$ を採用し、共析鋼では、 $\sigma_w = 21.8 \text{ kg/mm}^2$, $\tau_w = 16.0 \text{ kg/mm}^2$; $\sigma_s = 17.0 \text{ kg/mm}^2$, $\tau_s = 10.0 \text{ kg/mm}^2$ となり、 $\sigma_H = 24.0 \text{ kg/mm}^2$, $\tau_H = 17.5 \text{ kg/mm}^2$ を採用した。

4・2 純鉄材に対する測定結果

Fig. 4 (a), (b)には、き裂長さ l と進展限界応力の関係を示した。進展応力としては、き裂が存在しないときの試験片の公称応力を取り、き裂進展の有無の判定は繰返し数 $N = 2 \times 10^7$ 回の時点でを行った。図示のように、曲げおよびねじりのいずれに対しても、き裂試験片と焼なましき裂試験片の間には進展限界応力にはほとんど差異が認められない。また、 l の増加に伴う進展限界応力の減少割合は曲げのほうが著しい。繰返し数 10^7 回において処女平滑材と焼なましき裂試験片のすべり線発生限界応力の比を取り、き裂先端部の応

Fig. 4. Relation between the propagating stress and the crack length.

Fig. 5. Stress-concentration factor by slip-initiation phenomenon.

力集中率 α を測定した結果を Fig. 5 に示す。また、Fig. 6 (a), (b)にはそれぞれ σ_s , σ_{ss} におけるすべり線の発生状況の一例を示した。 α は、曲げ、ねじりともすべり線の発生が認められた測定点と認められなかった測定点の境界によって表わされるものと考えられ、したがって l の増加に伴う α の変化は曲げのほうがねじりよりも著しい。Fig. 7 には銅めっき応力測定法によって求めたひずみ(応力)集中率 α とき裂長さ l との関係を示した。 l の増加に伴う α の変化の傾向は、曲

Fig. 6. Slip lines by rotary bending.

Fig. 7. Strain-concentration factor by the electroplating method.

げおよびねじりの両場合ともすべり線の利用によって得られた結果と定性的に一致する。しかしながら、銅めっき法によって得られた α の大きさは、すべり線の利用による値よりも相対的に高い。これは、き裂先端で発生する銅めっきの成長粒子の大きさがほぼ 0.01 mm であり、純鉄材の平均結晶粒径 (0.04 mm) よりも著しく小さいので、すべり線によって α を測定した領域 (ほぼ一結晶粒) よりもさらにき裂先端に近い領域のひずみを測定していることに起因するものと考え

Fig. 8. Strain gradient in the vicinity of the crack tip by the electroplating method.

られる。銅めっき法を用いれば、き裂先端近傍のひずみ集中度のみならず、ひずみこう配も求めることが可能である。Fig. 8 には、き裂先端付近のひずみこう配の実測例を示した。曲げを受けて発生したき裂先端部のひずみ (応力) 集中度はねじりの場合に比べて相対的に高く、ひずみ (応力) こう配が急であることがわかる。これは両場合でき裂先端部が受ける応力状態に相違があること、すなわち、き裂が引張型であるか、せん断型であるかに起因するものと考えられる。

4・3 き裂先端部の応力集中度と切欠き係数

Fig. 9 には、き裂長さ l と応力集中度 β ならびに切欠き係数 β との関係をあわせて示した。なお、切欠き係数 β としては、 $\beta = (\text{平滑材の疲労限度} / \text{脆なましき裂試験片のき裂進展限界応力})$ によって定義した。図において、ねじりの場合には β とすべり線によって得られた α がほぼ一致し、両者は1本の直線で示されるようになる。き裂の進展が先端部のある範囲 ϵ における平均的応力集中度に支配されるものと考えれば、ねじりの場合には β とすべり線によって得られる α がほぼ一致するので、き裂の進展は先端の一結晶粒程度の領域に加わる繰返しせん断応力の大きさに支配されるものと考えられる。これに対して曲げの場合には、すべり線による α が β よりも大きいことから、き裂の進展は先

Fig. 9. Stress-concentration factor and fatigue-notch factor due to a crack (Pure iron).

端部の一結晶粒よりも広い領域に加わる繰返し引張応力の大きさに支配されるものと推定できる。

4・4 共析鋼に対する測定結果

共析鋼では、疲労限度近傍の繰返し応力の作用によって加工硬化とこれに伴う顕著なひずみ時効が起こる。この材質変化のため著しいかたさの上昇が生じ、処女材に比べて疲労限度やすべり線発生限界応力が高くなる。したがって、応力集中度ならびに切欠き係数などの調査に当たっては、上記の点を考慮して、すべて焼なましき裂試験片を使用した。

曲げおよびねじりに対して得られたき裂長さ l と進展限界応力との関係を Fig. 10 に示した。破線はねじりの場合にシェンク式疲労試験機の慣性誤差を考慮した修正き裂進展限界応力曲線である。曲げ、ねじりの両者とも過大応力によるき裂は引張型であり、き裂の表面長さに対する深さの割合もほぼ等しいことが確認されているが、図示のように同一き裂長さに対する進展限界応力はねじりの場合のほうが低くなっている。

Fig. 10. Relation between the propagating stress and the crack length.

Fig. 11. Stress-concentration factor by slip-initiation phenomenon.

Fig. 11 には、すべり線の発生現象を利用して測定した先端部の応力集中度 α とき裂長さ l との関係を示した。 l の増加に伴う α の上昇割合は、曲げの場合がねじりよりも大きくなる。また、曲げに対する結果を純鉄を用いて得た結果 (Fig. 5) と比較すると、同一き裂長さに対する α の値は共析鋼の場合のほうが高くなる。これは、純鉄ではき裂先端部の 0.04 mm 程度の領域に対する α を求めたのに対し、共析鋼では先端部におけるすべり発生基準として、およそ 0.01 mm の領域をとっているため、純鉄材の場合よりも先端に近い領域の集中度を測定したことによるものと考えられる。以上の結果から、繰返しねじりにおける引張型き裂は回転曲げにおける引張型き裂よりもき裂進展限界応力（したがって、すべり線発生限界応力）が低いにもかかわらず α が低いことになる。これは、曲げにおいては α を求める際に基準となる平滑材の微小要素が受ける応力状態とき裂先端部の微小要素が受ける応力状態が同じであるのに対して、ねじりでは異なっていることに起因する。すなわち、ねじりにおける引張型き裂先端部の微小要素は単純引張りの状態に近いと考えられるから、この場合の真の α を求めるには、すべり線発生限界応力として τ_s ではなく σ_s を用いる必要がある。

4・5 き裂先端部の応力集中度と切欠き係数

前節までに得られた結果および銅めっき法によって得られた結果をまとめれば、き裂長さと応力（ひずみ）集中度、切欠き係数などとの関係は Fig. 12 のようになる。ただし、ねじりにおける α および β は、見掛けの値であり、前節で述べた補正は行っていない。図示のごとく、同一き裂長さに対して銅めっき法による α は必ずしもすべり線による値よりも高くない。これはすべり線発生領域が 0.01 mm 程度であるため、銅めっき法による場合とほぼ等しい領域の集中度を測定したことによる。また、すべり線の利用による

Fig. 12. Stress-concentration factor and fatigue-notch factor due to a crack (Eutectoid steel).

α は、曲げおよびねじりのいずれの場合も、 β より高く、しかもき裂長さの増加に伴う α 曲線の変化状態は β 曲線と同じ傾向にある。これに対し、銅めっき法によって得られた α は、ねじりの場合には $l \geq 0.9$ mmでは β よりも低くなる。この結果から明らかなように、き裂先端部の応力集中率を測定する場合に、測定領域が同程度であれば、すべり線の利用による方法は銅めっき法よりも正確な測定結果をもたらすものといえる。銅めっき法では素材の結晶粒表面のひずみを測定するのに対し、すべり線の発生を利用する測定では結晶粒内部の変形も測定値に寄与することになる。き裂の進展には先端部における材料表面の応力値のみならず、内部の応力集中も重要な因子となる。さらに、き裂が進展する際にはすべり線の発生を伴うことを考慮すれば、すべり線の利用に基づくき裂先端部の応力集中率の測定法は、き裂の進展を検討する場合に有効な手法となるものと考えられる。

5 結 言

純鉄および共析鋼平滑材について、回転曲げおよび繰返しねじりに対するき裂の挙動をすべり線発生現象による方法と銅めっき応力測定法を用いて検討した結果、次の結論が得られた。

- (1) 同一き裂長さに対する引張型き裂の切欠き係数は、せん断型き裂の場合よりも高くなる。これは、前者のほうが先端部の応力集中率が高いことに起因する。
- (2) き裂作製時に生ずる硬化層の進展応力に及ぼす影響は、純鉄材ではほとんど現われないが、共析鋼では著しい。

(3) 純鉄材では、すべり線の利用によって得られる応力集中率は銅めっき法による結果よりも相対的に低くなるが、共析鋼では、必ずしも低くはない。これは、主としてき裂先端近傍における集中率の測定領域の広さに依存した現象である。

(4) き裂材の切欠き係数とき裂先端部の応力集中率との相互関係を検討した結果、両測定法において取り扱う先端部の微小領域が同程度の広さであれば、すべり線の利用による方法はより正確な結果をもたらす。

(昭和50年11月20日 シンポジウム「疲労における最近の諸問題」にて講演)

参 考 文 献

- 1) 西島 敏, 日本機械学会論文集, **32**, 1462 (1966).
- 2) たとえば, 平 修二, 田中啓介, 材料, **18**, 721(1969); 林 建吉, 牧野容正, 材料, **21**, 1157 (1972).
- 3) Underwood, J. H., and D. P. Kendall, Exp. Mech., **9**, 296 (1969); Schaeffer, B. J., H. W. Liu, and J. S. Ke, Exp. Mech., **11**, 172 (1971).
- 4) 大久保肇, “銅めっき応力測定法”, p. 45 (1965) 朝倉書店
- 5) Peterson, R. E., “Colloquim on Fatigue”, p. 186 (1955) Springer-Verlag
- 6) 清家政一郎, 北岡征一郎, 高 行男, 日本機械学会論文集, **40**, 1819 (1974).
- 7) 大久保肇, 酒井智二, 日本機械学会論文集, **33**, 495 (1967).
- 8) 石橋 正, 日本機械学会論文集, **32**, 1415 (1966).
- 9) 北岡征一郎, 高 行男, 日本機械学会講演論文集, 744, 7, 52 (1974).
- 10) 西島 敏, 材料, **12**, 528 (1963).