

539.43.01 : 539.388.1

1 応力サイクル間における停留き裂先端部の挙動*

西谷 弘 信**, 高尾 健 一***

1. 緒 言

停留き裂の発生する条件を明らかにすることは、切欠き材の疲れ限度に対する寸法効果や欠陥材の疲れ限度を検討する際に重要な意味を持つものと思われる。この観点から、著者の一人はいろいろな材料の環状切欠き試験片について回転曲げ疲れ試験を行い、分岐点（停留き裂が存在するか否かの限界）では最小断面の直径や切欠き深さにはほぼ無関係に、切欠き半径 ρ が一定になることを明らかにした^{(1)~(3)}。すなわち、分岐点の ρ を ρ_0 とおけば、 ρ_0 は材料定数である⁽²⁾。表 1 に示すように停留き裂が認められるか否かの限界は、 ρ のみによってほぼ規定されるが、き裂が停留する機構についてはまだ十分明らかにされていないようである。

回転曲げ疲れまたは引張り圧縮疲れにおいて、き裂が停留する現象は、石橋⁽¹⁰⁾や Fenner ら⁽¹¹⁾によって指摘されて以来、多くの材料において認められ、その停留き裂が発生する機構についてもいろいろな説明が試みられている^{(12)~(14)}。それらの説明の多くは少なくとも引張応力が負荷されている間は、き裂先端の開口にもとづく応力集中が起こっていることを仮定しているようである。もし切欠き底に発生したき裂の引張応力のもとでの応力拡大係数 K_I が、き裂長さとともに減少する傾向を有するならば、このように仮定してもき裂の停留機構を説明できる可能性がある。しかし、切欠きがいくら鋭くても、切欠き底にき裂が発生したときの引張応力下における応力拡大係数は、き裂

長さが増加するとともに単調に増加する⁽¹⁵⁾ので、引張応力下における応力集中だけから停留き裂の発生する機構を説明することはむずかしいものと思われる。

そこで本論文においては、低炭素鋼の回転曲げ疲れ試験において、試験片平行部の小穴の縁から発生した停留き裂先端および平滑材に観察される微視的停留き裂の先端に注目し、それらの停留き裂先端付近が 1 応力サイクル間にうける変形状態を微視的に測定し、切欠き材の停留き裂および平滑材の微視的停留き裂の発生機構について検討を加えた。

最近、Elber は伝ばしているき裂の先端からいくぶん離れた後方の一点で、片振り引張荷重のもとにおけるき裂の開口変位を測定し、その開口変位と荷重との関係からき裂先端付近は片振り荷重のもとにおいても繰返し応力幅の約 50% 付近まで閉じていることを指摘している⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。この現象は疲れき裂の伝ばを考える際に基本的な意味を持つものと思われる^{(16)~(18)}。

2. 材料、試験片および実験方法

素材は市販の S10C 圧延丸棒（長さ約 5m、直径約 22mm）であり、それを 904°C で 1 時間焼なまししたのち試験片を製作した。焼なまし材の化学成分および機械性質を表 2 に示す。

用いた試験片は図 1 (a) および (b) に示す 2 種類である。前者は浅い切欠きを有しているが、その切欠き係数が 1.06 であるので、平滑試験片と見なし得る（以下ではこれを平滑試験片と呼ぶ）。後者は平行部の中央に 1 個の小穴（直径 0.3mm、深さ 0.3mm）を

表 1 各種材料の分岐点の切欠き半径 ρ_0 の値

| 材 料 (文献) | σ_{sl} kg/mm ² | σ_B kg/mm ² | ρ_0 mm | 材 料 (文献) | $\sigma_{0.2}$ kg/mm ² | σ_B kg/mm ² | ρ_0 mm |
|----------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------|---------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------|
| S10C 焼なまし材 (4) | 21.0 | 38.0 | 0.6 | 純銅焼なまし材 (7) | 4.0 | 22.1 | 0.4 |
| S25C 焼なまし材 (5) | 30.3 | 50.4 | 0.5 | 70/30 黄銅焼なまし材 (8) | 10.2 | 31.7 | 0.6 |
| S25C 加工層材 (2) | 30.3 | 50.4 | 0.5 | SNC3 焼入れ焼もどし材 (6) | 86.5 | 97.1 | 0.4 |
| S30C 焼なまし材 (4) | 31.5 | 54.8 | 0.4 | SNCM26 焼入れ焼もどし材 (9) | 116.3 | 141.7 | 0.1 |
| S35C 焼なまし材 (1) | 34.3 | 61.2 | 0.4 | S50C 焼入れ焼もどし材 (3) | 102 | 142 | 0.1 |
| S50C 焼なまし材 (4) | 35.3 | 68.7 | 0.25 | | | | |

* 昭和 48 年 10 月 16 日 第 51 期全国大会講演会において論文講演として講演，原稿受付 昭和 48 年 5 月 7 日。

** 正員，九州大学工学部（福岡市東区箱崎）。

*** 正員，佐賀大学理工学部。

持ったものである(以下ではこれを小穴付き試験片と呼ぶ)。試験片製作後、600°C で1時間真空焼なましを行い、その後さらに表面を約 10 μ 程度電解研磨により取り除いたのち実験した。電解研磨を行ったのは試験片製作時の加工層を取り除き、表面観察を容易にするためである。

試験機は小野式回転曲げ試験機で、回転数は毎分約 2800 回である。

応力変化によって生ずるき裂開口量は、電解研磨した試験片表面のエッチピット、結晶粒界および結晶粒内のすべり帯中の模様など、き裂の両側にある一对の基準点の間隔の変化から求めた。その間隔変化の測定は、疲れ試験における応力振幅を σ_a とするとき、 $-\sigma_a$ から $+\sigma_a$ まで $\sigma_a/4$ ずつ応力を増加させながら、各応力段階で試験機に取付け可能な顕微鏡で直接き裂先端付近(平滑材の微視的停留き裂はき裂全長を一度に撮影できる)を撮影し、そのネガティブフィルムをスライド投影機でスクリーン上に 5000 倍に拡大して投影し、そのスクリーン上で行った。平滑試験片の疲れ限度より少し小さい応力を 10⁷ 回繰返したとき発生する微視的停留き裂の場合には、 $-\sigma_a$ と $+\sigma_a$ の2段階の応力レベルで撮影した結果のみを示している。特に正の応力レベルにおける撮影は、試験機に取付けた試験片の上側に正の応力を加えることができる装置を製作し、それを用いて行った。

平滑試験片に発生した微視的停留き裂および小穴付き試験片に発生した停留き裂の両方共、 $-\sigma_a$ および $+\sigma_a$ におけるき裂先端の開口状態および先端付近の

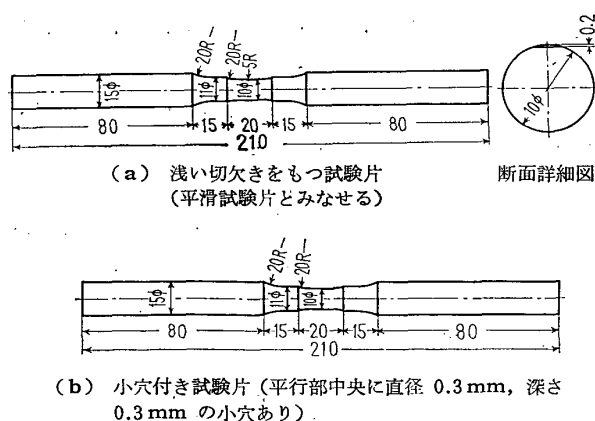


図 1. 試験片寸法

材料の変形状態の差異を調べるために、 $-\sigma_a$ および $+\sigma_a$ においてき裂先端を含む表面のプラスチックレプリカを採取し、それらに真空中でクロムおよびカーボンを蒸着したのち、それらを電子顕微鏡で観察した。

さきに図 1 (b) の形状の試験片について行った疲れ試験結果⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾ から、き裂面の形はき裂が小さい範囲では材質や応力レベルに無関係にほぼ半円状を呈すること、従ってそのとき表面におけるき裂伝ば速度と内部におけるそれとはほぼ等しいことがわかっている。このことから表面におけるき裂伝ば挙動をもとに内部におけるき裂伝ば挙動を推定することは十分な根拠を持つものと思われる。

3. 実験結果および考察

図 2 は平滑試験片の表面に、疲れ限度よりわずかに小さい応力を 10⁷ 回繰返したとき観察される微視的停留き裂の開口状態を示したものである。図 3 は、図 2 のき裂の先端付近の電子顕微鏡写真である。

図 4 は、小穴付き試験片にき裂強さの応力 σ_w を繰返すとき、小穴縁から発生したき裂が応力繰返し数 N とともに伝ばして行く状態を示したものである。 $N=5.5 \times 10^6$ 回ではほき裂は停留することがわかる。図 5 は、小穴付き試験片にき裂強さ σ_w の応力を繰返すときの $N=10^6$ 回および $N=10^7$ 回におけるき裂の写真である。図 6, 7 はそれぞれ図 5 (a) に示すき裂に、応力を段階的に増加させながら加えるときの各応力段階での写真とき裂開口量の測定結果である。この状態 ($N=10^6$ 回) ではき裂は伝ばしているが(図 4 の A 点)、徐々に伝ば速度を減少してついには伝ばを停止する。図 8, 9 は繰返し数 $N=10^7$ 回における小穴付き試験片の停留き裂 [図 5 (b)] の図 6 および 7 に相当する写真および開口量の測定結果である。図 10 は停留き裂先端付近の電子顕微鏡写真である。

図 11, 12 はだ円切欠きの切欠き底にき裂がある場合の弾性応力計算の結果である。

3.1. 平滑試験片の微視的停留き裂 図 2, 3 からわかることを列挙すれば次のとおりである。

(i) 平滑試験片に疲れ限度 ($\sigma_{w0}=17.5 \text{ kg/mm}^2$)

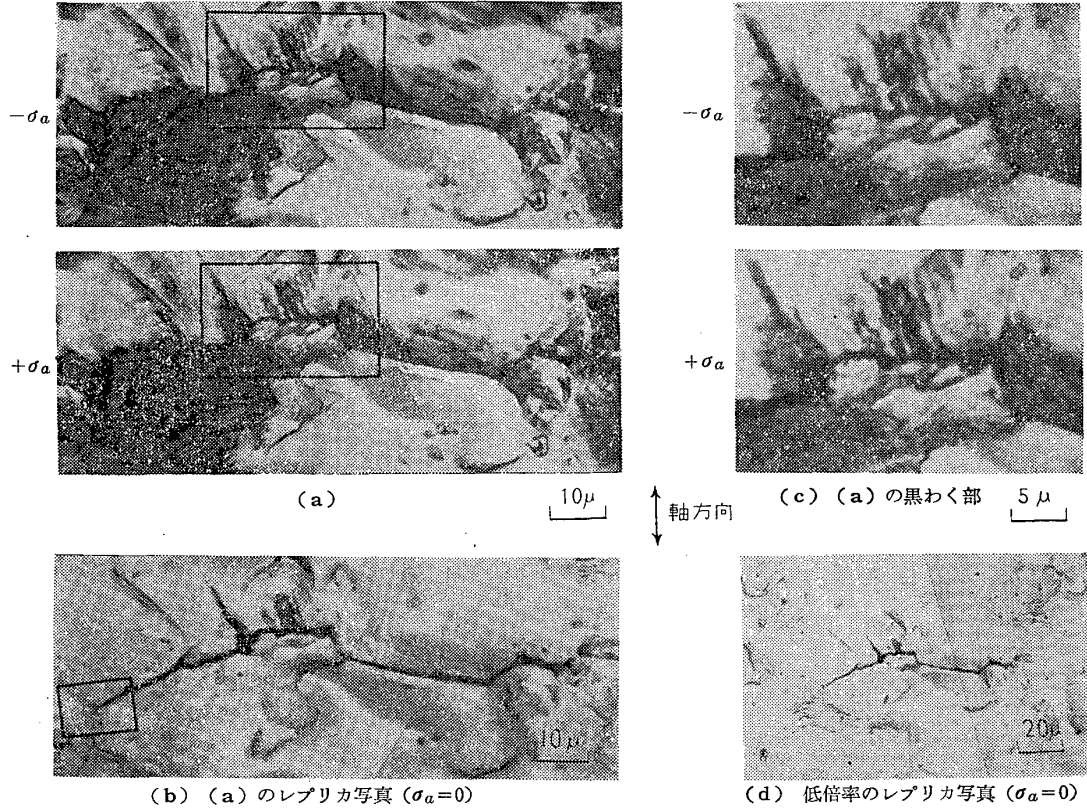
表 2 化学成分および機械性質

| 化 学 成 分 | | | | | | | | 機 械 性 質 | | | |
|---------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|--------------------|------------|------------|------|
| % | | | | | | | | kg/mm ² | | | % |
| C | Si | Mn | P | S | Cu | Al | Ni+Cr | σ_{sl} | σ_B | σ_T | 絞り |
| 0.13 | 0.22 | 0.09 | 0.013 | 0.022 | 0.09 | 0.010 | 0.01 | 21.0 | 38.0 | 78.7 | 67.7 |

のわずか下の応力 (17.0 kg/mm^2) を 10^7 回繰返せば, 表面に長さ約 0.1 mm の微視的停留き裂が認められる. 別の試験片を用いて, 同じ応力を 10^7 回繰返して認められた微視的停留き裂は, さらに 3×10^7 回

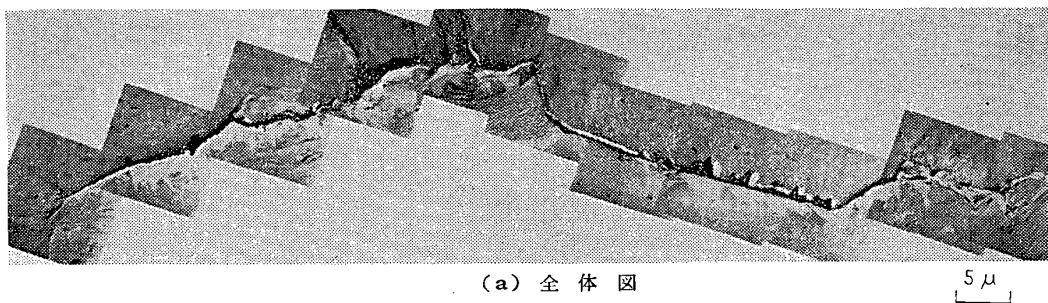
同じ応力を繰返してもほとんど伝ばしなかった⁽²¹⁾.

(ii) 図2(c)からわかるように, 微視的停留き裂の中央部でのき裂の開口状態は, $+\sigma_a$, $-\sigma_a$ とで異なっており, $+\sigma_a$ のもとでき裂中央部は明らかに開

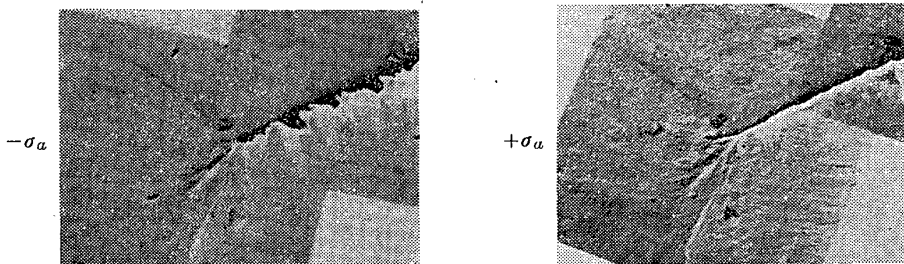


(b) (a) のレプリカ写真 ($\sigma_a=0$)
 $\sigma_a=17.0 \text{ kg/mm}^2$, 疲れ限度は 17.5 kg/mm^2

図2 平滑試験片表面の微視的停留き裂



(a) 全体図



(b) 図2(b)の黒わく部
 $\sigma_a=17.0 \text{ kg/mm}^2$

図3 平滑試験片表面の微視的停留き裂の電顕写真

口している。一方き裂先端付近での開口状態および先端付近の材料の変形状態には $+\sigma_a$ と $-\sigma_a$ とでほとんど差異が認められない [図3(b)]。このようにき裂先端付近は最大応力時においてもほとんど開口しないので、き裂先端に特に疲れ被害が蓄積されるとは考えられない。このため同一応力をいくら繰返してもき裂は伝ばしないものと思われる。

3.2 切欠き試験片の停留き裂 1章に述べたように、S10C 焼なまし材の分岐点の切欠き半径 ρ_0 は約 0.6 mm である。図1(b)に示す試験片の切欠き(小穴)の切欠き半径 ρ は 0.15 mm ($<\rho_0$) であるので、この試験片には停留き裂が発生し得る。

図1(b)に示す試験片にき裂強さの応力 σ_{w2} を繰返す場合、小穴縁から発生したき裂は 10^6 回の応力繰返しでは伝ばしているが(図4)、繰返し数の増加とともに徐々にき裂伝ば速度を減少し、 $N=5.5 \times 10^6$ 回で

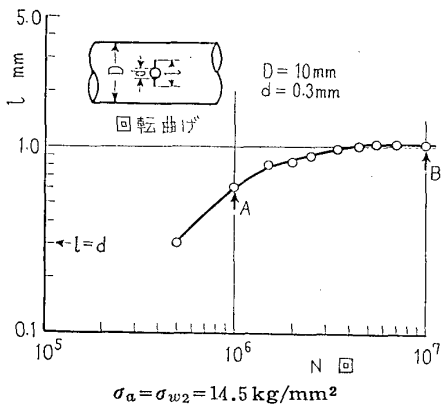


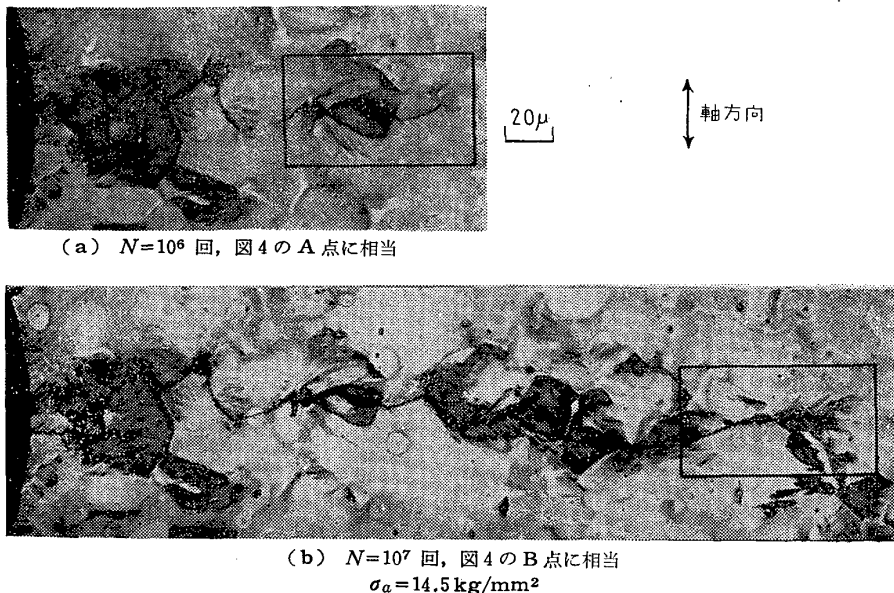
図4 小穴付き試験片におけるき裂長さとの繰返し数との関係

はついに伝ばしなくなり、 10^7 回の応力繰返し後のき裂長さは 5.5×10^6 回でのそれとほとんど同じである。 10^6 回におけるき裂伝ば速度は小さいけれども、図6, 7に示すように最大応力時においてき裂先端は開口しているのがはっきりわかる。一方、図8, 9に示すように、 10^7 回における停留き裂においては、き裂先端から約 50μ 離れたところではそのき裂は最大引張応力時にはっきり開口しているけれども、き裂先端では最大引張応力時においてもほとんど口を閉じたままであることがわかる。

図10に示す電子顕微鏡写真上でも、き裂先端の開口状態およびき裂先端付近の材料の変形状態には $-\sigma_a$ と $+\sigma_a$ とで、ほとんど差異が認められない。

この現象は最近、Elber⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ や Adams⁽¹⁸⁾ が指摘しているように、荷重増加時にき裂先端付近の材料が受ける塑性変形と荷重を減少するときのそれとが異なるためであると考えられる。すなわち、材料が繰返し荷重を受けているとき、伝ばしているき裂面上に残留引張り変形が残されるためであろうと考えられる。

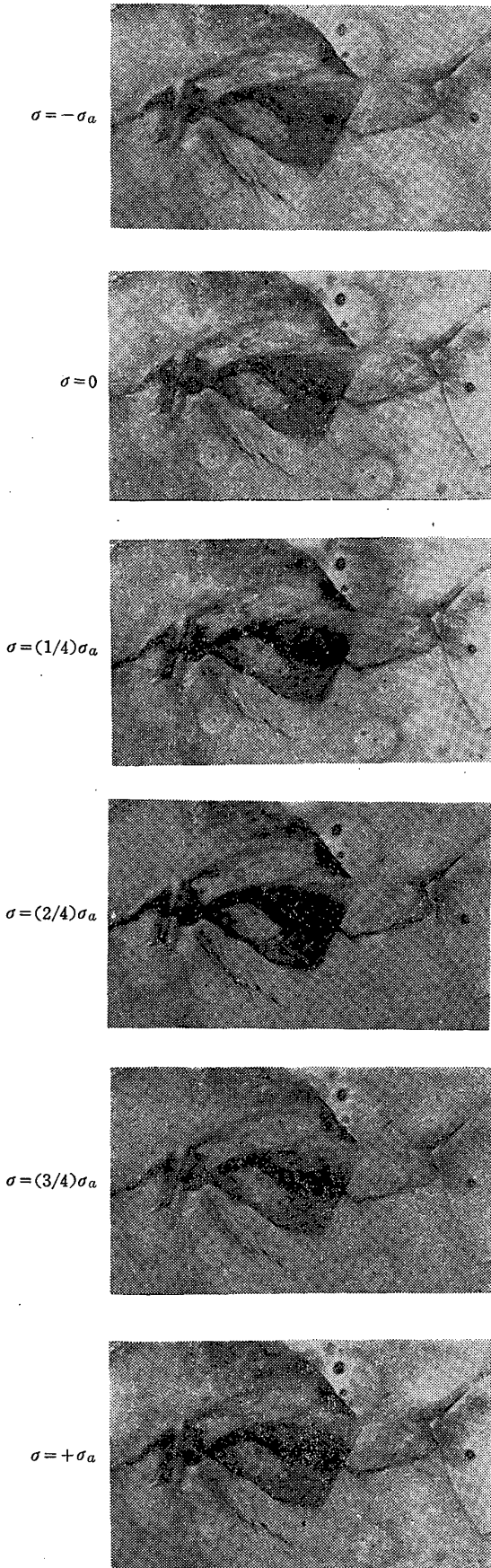
今、公称繰返し応力幅 $2\sigma_a$ に対する、き裂が開口している応力範囲の比を $\Delta K_{\text{eff}}/\Delta K$ と定義すれば、 $\Delta K_{\text{eff}}/\Delta K$ は一定応力を繰返す本実験の場合、き裂の長さに関係している。停留き裂が存在し得る条件のもとでは、 $\Delta K_{\text{eff}}/\Delta K$ はき裂が伝ばするに従って減少し、ついにはほぼ0となって、き裂はそれ以上の応力繰返しによって伝ばすることなく、停留き裂になると考えられる。すなわち、停留き裂が生じているときには、最大応力時におけるき裂の開口量は極端に小さく、き裂先端付近の材料はほとんど疲れ被害を受け



(a) $N=10^6$ 回, 図4のA点に相当

(b) $N=10^7$ 回, 図4のB点に相当
 $\sigma_a=14.5\text{ kg/mm}^2$

図5 小穴付き試験片の停留き裂



(a)

ず、それゆえき裂はそれ以上伝ばしないものと思われる。

平滑試験片においても、上述の現象と同様な現象が起こっていると考えられる。すなわち平滑試験片に疲れ限度 σ_w 。またはそれ以下の応力を繰返す場合、すべりの繰返しによって応力繰返しの比較的初期 ($\sigma = 17.0 \text{ kg/mm}^2$ で $N = 10^6$ 回) に 1 結晶粒程度のき裂が発生する⁽²¹⁾ が、そのき裂がその後の応力繰返しによってある程度伝ばして止まってしまふ。 $N = 4 \times 10^6$ 回でのき裂長さ と $N = 10^7$ 回でのき裂長さとはほとんど差がなかった⁽²¹⁾。 図 2, 3 からわかるように、本実験の場合にも、発生した 1 結晶粒程度のき裂が伝ばを開始するときには、き裂先端は開口しているものと思われるが、き裂長さの増加とともに $\Delta K_{eff}/\Delta K$ は小さくなり、ついにはほとんど 0 になってき裂はそれ以上伝ばせず、微視的停留き裂になるものと考えられる。

3.3 切欠き試験片における停留き裂の発生機構

回転曲げ疲れや引張り圧縮疲れにおいて、分岐点の切欠き半径 ρ_0 は、切欠きが極端に浅くない限り、切欠き深さや最小断面の直径にほぼ無関係に材料定数となるが、これは切欠き底の最大応力をそえたときの切欠き底付近の応力分布が切欠き半径のみによってほぼ決まるためである⁽²⁾。このことはだ円切欠きの切欠き底にき裂がある場合の応力解析の結果を考慮すればさらに明確になる⁽¹⁵⁾。

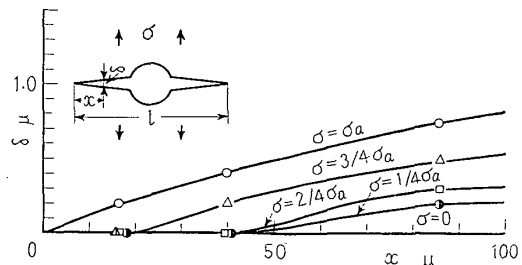
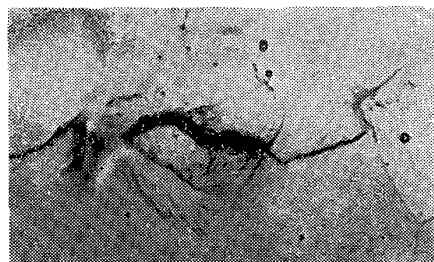


図 6 参照, $\sigma_a = 14.5 \text{ kg/mm}^2$, $l = 0.615 \text{ mm}$, $N = 10^6$ 回

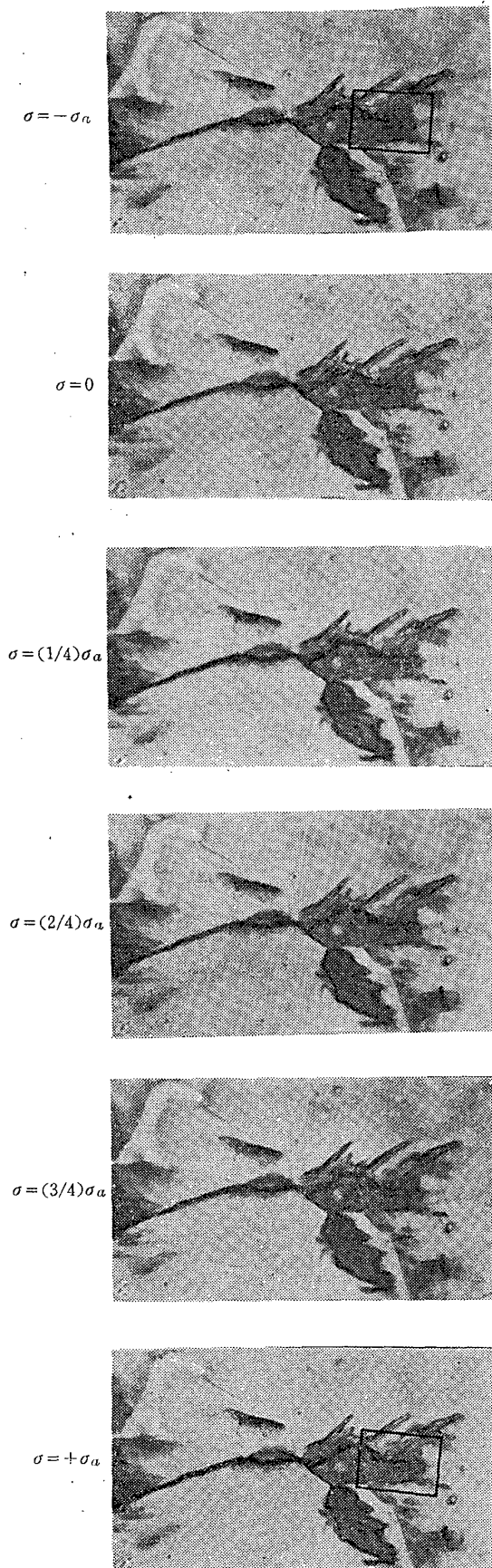
図 7 図 4, A 点におけるき裂先端の開口状態



(b) (a) のレプリカ写真

$\sigma_a = 14.5 \text{ kg/mm}^2$, $l = 0.615 \text{ mm}$, 図 5 (a) の黒く部

図 6 $N = 10^6$ 回での、伝ば中のき裂の開口状態



(a) 図5(b)の黒わく部

$$\sigma_a = 14.5 \text{ kg/mm}^2, N = 10^7 \text{ 回}, l = 1.042 \text{ mm}$$

図 8 停留き裂先端の開口状態

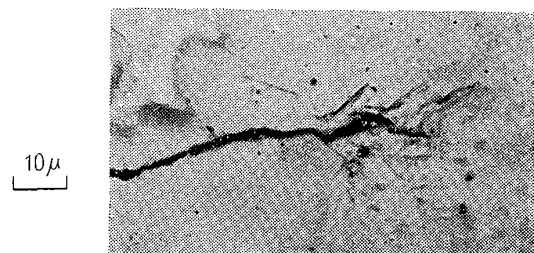
これまでいくつか停留き裂発生の機構について説明がなされているが^{(12)~(14)}, それらの多くは停留き裂の先端は圧縮応力の下では閉じているが, 引張応力の下では開いていると仮定しているようである. しかし, 弾性応力計算の結果によれば切欠き底に長さ λ なるき裂がある場合のき裂の応力拡大係数 K_I はたとえ切欠きが非常に鋭くても, き裂長さ λ とともに単調に増加するので(図12参照⁽¹⁵⁾), 上述のような仮定のもとで停留き裂が発生する機構を説明するのはむずかしいと思われる.

回転曲げ疲れにおける停留き裂に関する本実験の結果によれば, $\rho < \rho_0$ なる切欠き試験片にき裂強さ σ_w 以下の応力を繰返す場合, 切欠き底から発生したき裂が伝ばを停止する以前の過程では, 応力を $-\sigma_a$ から $+\sigma_a$ まで増加していくとき, き裂先端は応力が0を越えてもすぐには開口しないが, かなりの応力範囲において開口している. しかしき裂が長くなるに従って, $\Delta K_{\text{eff}}/\Delta K$ は徐々に小さくなり, ついにはほぼ0となる. このように $\Delta K_{\text{eff}}/\Delta K$ が極端に小さくなると, き裂先端部にはほとんど疲れ被害は蓄積されなくなり, き裂はそれ以上伝ばしなくなる.

すなわち, 停留き裂が発生した状態では, 外力から加えられる応力変動の大部分は接触したき裂面の面積の増減に使用され, き裂先端に開口変位を与え, き裂としての実質的応力集中を生ずるための応力変動範囲はほとんど0となる⁽²²⁾.

この接触したき裂面の, 面積の増減によって, 応力変動を受け持つようになる現象が, 停留き裂発生の直接の原因であると思われる.

ρ_0 の値を直接決めるためには, 切欠き底にき裂が発生するための条件(1結晶程度の領域が関係するものと思われる)と切欠き底に発生したき裂の先端にさらにき裂が成長して行くための条件(fatigue striationの存在からも推定されるように, それには1結晶粒よりはるかに小さい領域が関係するものと思われる)を知る必要があるので, 現状では ρ_0 は疲れ試験

(b) (a)のレプリカ写真($\sigma = -\sigma_a$)

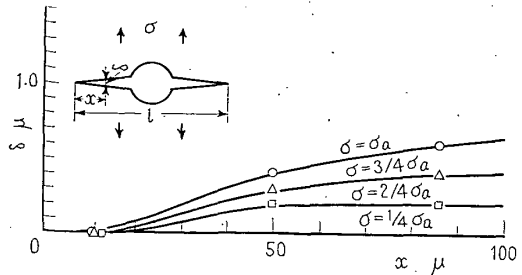
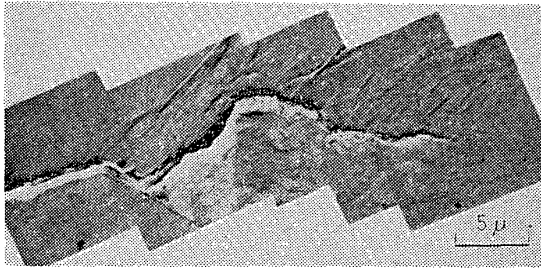
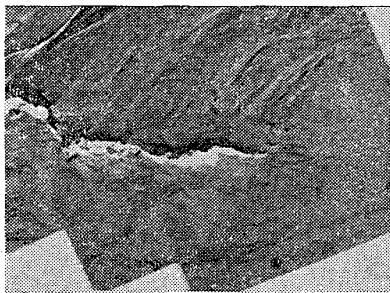


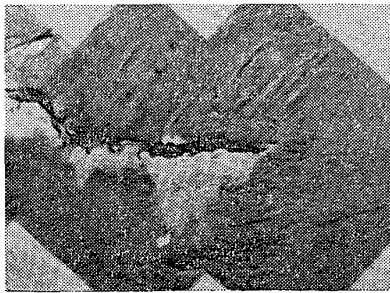
図 9 停留き裂の開口状態



(a)



$\sigma = -\sigma_a$



$\sigma = +\sigma_a$

(b) 図 8(a) の黒わく部

図 10 停留き裂先端の電顕写真

によって実験的に決めるしかないものと思われる。

4. 結 論

焼なましした S10C 低炭素鋼の回転曲げ疲れにおける、平滑試験片の表面に発生した微視的停留き裂および切欠き試験片（小穴付き試験片）の切欠き底（小穴縁）に発生した停留き裂の開口を観察、測定し、き裂閉口現象（crack closure phenomenon）と停留き裂の発生する機構との関係を検討し、以下の結論を得た。

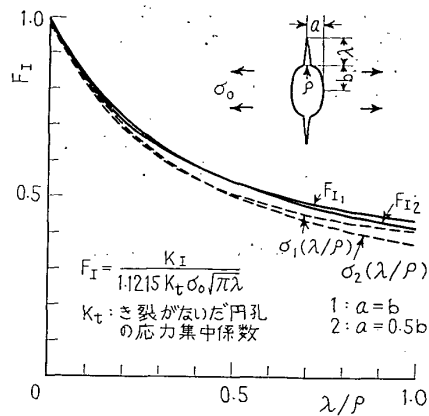


図 11 無次元化した応力拡大係数とき裂がない場合の切欠き底の応力分布

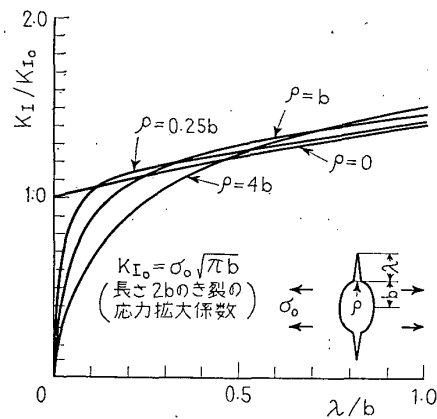


図 12 切欠き底に発生したき裂の長さとき裂の応力拡大係数との関係

(1) 平滑試験片に疲れ限度またはそれよりわずかに小さい応力を 10^7 回繰返す場合、試験片表面に微視的停留き裂が観察される。そしてそのき裂の先端は応力繰返しの間、最大応力時においてもほとんど口を閉じているようである。

(2) 切欠き底（小穴縁）に発生した、いわゆる停留き裂の先端は最大応力時においてもほとんど口を閉じているようである。

(3) (1), (2) から微視的停留き裂あるいはいわゆる停留き裂の先端部の材料は、それらのき裂を発生させた応力をいくら繰返しても、それ以上ほとんど疲れ被害を受けないものと考えられる。

文 献

- (1) 西谷, 機論, 31-221 (昭 40-1), 48.
- (2) 西谷, 機論, 34-259 (昭 43-3), 371.
- (3) Nisitani, H., *Proc. 1971 Int. Conf. Mech. Behavior of Materials*, 2 (1972), 312.
- (4) 西谷・西田, 材料強度誌, 5-3 (昭 45), 84.
- (5) 西谷, 機械前刷, No. 129 (昭 40-4), 107.
- (6) 西谷, 機械前刷, No. 105 (昭 37-4), 195.
- (7) 西谷, 機械前刷, No. 73 (昭 37-10), 65.
- (8) 西谷・岡坂, 機論, 39-317 (昭 48-1), 49.

- (9) 西谷, 材料学会前刷, (昭 41-5), 31.
 (10) Isibasi, T., *Mem. Fac. Engng., Kyushu Univ.*, **12** (1951), 281.
 (11) Fenner, A.J., ほか2名, *Engineering*, **171** (1951-5), 637.
 (12) 中沢・小林, 機械の研究, **20** (昭 43), 1635; **21** (昭 44), 49; **21** (昭 44), 371; **21** (昭 44), 507.
 (13) 金属学会編, 金属材料の強度と破壊, (昭 39-3), 301.
 (14) 横堀, 材料強度学 (岩波全書), (昭 39-6), 208, 岩波書店.
 (15) 西谷・石田, 機論, **39-317** (昭 48-1), 7.
 (16) Elber, W., *Engng. Fract. Mech.*, **2** (1970), 37.
 (17) Elber, W., *ASTM STP*, 486 (1971), 230.
 (18) Adams, N.J.L., *Engng. Fract. Mech.*, **4** (1972), 543.
 (19) 西谷・河野, 機講論, No. 700-12 (昭 45-10), 41.
 (20) 西谷・森光, 機講論, No. 710-9 (昭 46-10), 45; No. 720-1 (昭 47-4), 25.
 (21) Nisitani, H. and Takao, K., *Proc. 1971 Int. Conf. Mech. Behavior of Materials*, **2** (1972), 153.
 (22) 西谷, 機講論, No. 710-7 付録, 討論集, (昭 47-3), 9.

討 論

〔質問〕 小林英男 (東京工業大学)

停留き裂の本質にかかわる興味深い実験結果に対して敬意を表したい。

(1) 平滑材の微視的停留き裂を切欠き材の停留き裂と同じように扱っておられるが, 平滑材の微視的停留き裂は質問者らがかねてから主張しているように(付1), いわゆる第1段階のものである。それは試験片の内部方向にはすべり帯に沿うせん断形となっているから, 第2段階に移りしなやかぎり顕著に開口しないのは当然であり, Elber の言うような閉口現象が生じているとは考えられない。もし, 著者らの説明のとおりならば, 10^7 回で停留する以前のそれよりも小さい表面長さの場合には, そのき裂の先端は開口状態になければならないはずである。実際にそのような状態を観察されておられるのか。

(2) もし, 平滑材と切欠き材での停留き裂の機構が, 著者らが2730ページ右欄22~29行めに述べておられるように同じものならば, 停留き裂は切欠きの有無, あるいは鋭さに関係なく観察されるはずであり(実際に微視的停留き裂は平滑材ばかりでなくすべての切欠き材に観察される)(付1), 著者らの主張する停留き裂が存在するための切欠きの幾何学的条件, 例えば ρ_0 は無意味なものになってしまうのではないか。

(3) 鋭い切欠き材の第2段階のき裂が停留する場合に, その先端が開口状態から閉口状態になること自体は, 非常に興味深い結果である。しかしながら, その原因はやはり従来から主張されているように, 切欠きとき裂の重畳効果として理解すべきだと思う。具体的には, 鋭い切欠き底ではき裂が単独に存在する場合よりも, 塑性域ないし残留ひずみが大きいことが期待できれば, Elber の言う閉口現象も顕著に生じ, き裂は停留に至ることが考えられる。またそのことは, Elber らの結果はすべて片振りであるが両振りのもとでの閉口現象がどうなるかという, 従来から良く知ら

(付1) 中沢・ほか5名, 機論, **40-329** (昭 49-1), 9.

れている停留き裂の本質的な部分(片振りのもとで生じないという)にもかかわり合いを持つものと思われる。

〔回答〕 (1) 我々も第1段階の微視的停留き裂の存在を否定するものではない。特にそのようなものは平滑材の疲れ限度 σ_{w2} より小さい応力で多く認められる(我々はそのような1結晶粒程度の微視的停留き裂が発生するまでの過程は, き裂伝ば特性をほとんど含まないと考えている⁽²¹⁾)。しかし平滑材に破断, 非破断の限界応力を繰返した場合には, 図2, 3に示すように, わずかながらき裂伝ば過程を含んだ微視的停留き裂が認められる。このような場合には, 図3に見られるき裂閉口現象が認められ, これはいわゆる鋭い切欠き材の停留き裂先端の閉口現象と非常によく似ている。

図2, 3の場合には, 10^7 回よりずっと以前にき裂先端は開口状態になっていると考えられるが, その測定は非常に困難であり, その状態を観察していない。

(2) 著者らの研究室においても, ご指摘のように, 鋭くない切欠き材において微視的停留き裂を観察している。しかしながら ρ_0 は以下の理由から無意味なものとはならない。

すなわち種々な大きさの切欠き半径を有する切欠き試験片に σ_{w1} の応力を繰返す場合, 切欠き底付近の材料はほぼ平滑試験片表面におけると同様な挙動を示すことを著者らは報告してきた⁽²⁾⁽³⁾。ここで生じる停留き裂は微視的停留き裂であり, そのようなき裂の発生は材料の組織の不均一や時効硬化特性などがき裂閉口現象と関係しながら, 局所的に起こる現象であるのに対し, ρ_0 より小さい切欠き半径 ρ をもつ切欠き試験片に, $\sigma_{w1} < \sigma_a \leq \sigma_{w2}$ なる応力 σ_a を繰返せば, 組織に関して局所的に発生したき裂が数結晶粒程度伝ばし, いわゆる明らかな第2段階のき裂伝ば状態に入り, 個々の応力サイクルで非結晶学的に伝ばして停留き裂になる。

き裂閉口現象に関しては両者はよく似ているが、いわゆる鋭い切欠き材に見られる停留き裂は、従来著者らが報告してきたように、力学的な条件、従って ρ_0 に支配されるものである。

(3) 我々も指摘のように、き裂停留現象は切欠きとき裂の重畳効果として理解すべきであると思っている。この立場は切欠きによる応力分布とき裂の干渉効果がき裂停留現象に対して本質的な意味をもつとするもので、従って応力分布を直接支配する切欠き半径が停留き裂の発生に直接関連する立場と全く同一である。ここでは切欠きとき裂の重畳効果の結果、図8, 9に見られる閉口現象が起こることを指摘したいのである。

〔質問〕 柴田俊忍(京都大学工学部)

き裂が停留する原因を、き裂の先端が最大応力時においても口を閉じていることによる、すなわち図7の状態では開口しているためき裂は進行し、図9の状態では口を閉じているため停留するとしておられる。図9の状態となるためには、き裂がある程度進行し、その間図7のように開口状態にあったものが急に口を閉じるようになるものか、あるいは図9のように口を閉じた状態である程度進行して停留するものか、どのようにお考えか。

〔回答〕 2730 ページに定義した $\Delta K_{\text{eff}}/\Delta K$ が小さい程、き裂伝ば速度は小さいと考えられる(付2)。停留き裂を生ぜしめるような応力振幅によって切欠き底から発生したき裂は、図5に示すように、繰返し数の増加とともに、徐々に伝ば速度を減少しているが、そのとき $\Delta K_{\text{eff}}/\Delta K$ も徐々に減少し、1 に比べて非常に小さくなるまでは、すなわちき裂先端の開口変位が弾性変形に比べて十分小さくなるまでは、徐々にではあるがき裂は伝ばし続けると考えているが、図9のような状態になると、それ以上伝ばしない。

〔質問〕 萩原芳彦(武蔵工業大学)

停留き裂の機構について力学的な見地から検討されているようだが、コーキング効果のような組織的な見方(付3)についてはどのようにお考えか。

〔回答〕 コーキング効果は、き裂先端のみに注目すればよい現象(付4)(付5)であり、従ってその意味で組織的な見方に全く無関係ではないが、コーキングの有無にかかわらず、き裂の伝ばおよび停留に根本的なかわりをもつのがき裂閉口現象である。

(付2) 西谷・高尾, 機講論, No. 730-1 (昭48-4), 105.

(付3) たとえば 河本・木村, 機論, 25-155 (昭34-7), 552.

(付4) 西谷・西田, 機講論, No. 198 (昭43-9), 83.

(付5) 西谷・西田, 機論, 39-321 (昭48-5), 1385.