

# 炭素鋼予加工材の横穴よりの疲れき裂の挙動\*

— 回転曲げ疲れの場合 —

追分重義\*\*

宇野和雄\*\*

三浦節男\*\*

(昭和52年4月30日受理)

## The Behavior of Fatigue Cracks Initiated at the Brim of the Lateral Hole of Prestrained Carbon-Steel Specimens under the Rotating Bending Fatigue Test

by Shigeyoshi OIWAKE, Kazuo UNO  
and Setsuo MIURA

Fatigue tests were undertaken on the S35C steel specimens annealed for the study in the heading. The main object was to find how the cooperation of the configuration and the prestraining influences the fatigue strength of the specimens.

It was found that the work-hardening effect due to the prestrain, and the stress gradient and the stress concentration near the entrance of the hole seem to work out behaviors peculiar to fatigue in cooperation with each other, such as the microplastic sliding, opening and closing of fatigue cracks, etc. The crack propagation rate  $dl/dN$  in this case became constant.

### 1. 緒 言

疲れ試験前の予加工の疲れ過程に与える影響<sup>1)~4)</sup>、横穴材の疲れき裂の進展<sup>5)~6)</sup>等についてはこれまで各方面で調べられているが、予加工を受けた横穴材における疲れき裂の挙動を調べたい。材料的な予加工の影響と、形状的な横穴による影響とが、き裂の挙動や材料の疲れ強さとどのような因果関係を持つかを観測して、検討を加えることが本研究の目的である。なおき裂の挙動はその長さ、進展速度、開き幅などについてとらえている。

### 2. 実 験

#### 2.1 供試材と試験機

供試材は S35C 鋼焼鈍材で表-1 にその化学成分と機械的性質を示す。焼鈍は原材を

\* 日本機械学会北海道支部講演会に講演 (52.8.28)

\*\* 北見工大機械工学科

表—1 供 試 材  
Table 1. Tested material

材 料	S35 C							
化学成分 (%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
	0.33	0.23	0.73	0.025	0.014	0.02	0.02	0.02
機械的性質	降 伏 点 $\sigma_s$ (kg/mm <sup>2</sup> ): 31.3		最 六 応 力 $\sigma_B$ (kg/mm <sup>2</sup> ): 54.5		伸 び $\lambda$ (%): 24.6		絞 り $\phi$ (%): 56.6	

1,120°C に 5 時間保持した後に炉中冷却し、さらに 850°C まで昇温し 40 分間保持した後に炉中冷却した。第一次の焼鈍は圧延による帯状組織を拡散し、第 2 次の焼鈍は材料の強さを回復するために行なった。図-1 は試験片の形状、寸法であって、(a) は回転曲げ疲れ試験機のチャックに取付き、(b) はその前に予引張りを与えるときに引張試験機の板チャックでつかむようにつかみの外周に平面を設けたものである。板チャックは予引張り後試験片にあまり圧縮力を加えないで引張試験機から取はずすために用いた。

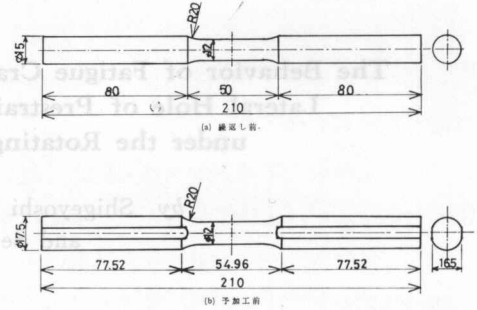


図-1 試験片  
Fig. 1. Test pieces.

試験片は成形後弗化水素の過酸化水素水溶液で化学研磨して表面層を約 50  $\mu$  落とし加工変質層の除去を図った。有穴試験片はこの後に錐で穴を開けた後再度化学研磨した。

疲れ試験機は小野式回転曲げ疲れ試験機、容量 10 mkg を用い、繰返速度 2,800 c.p.m で運転した。

## 2.2 定応力試験

予ひずみは小さいひずみとして  $\epsilon \div 2\%$ 、大きいひずみとして  $\epsilon \div 14\%$  の塑性ひずみを与えた。本供試材では  $\epsilon \div 2\%$  は降伏点より約 15% 高い引張力、最大荷重の約 70% の引張力により、 $\epsilon \div 14\%$  は最大荷重にきわめて近いがこれに未満の引張力によって生じ、最大荷重における塑性ひずみの約 95% である。横穴の直径は  $\delta = 1.2, 2.4, 3.6$  mm とした。まず  $\epsilon = 0, 2, 14\%$  と  $\delta = 0, 1.2, 2.4, 3.6$  mm の 12 通りの組合わせの条件の試験片の定応力回転曲げ疲れ試験を行ない SN 曲線を求めた。この際応力振幅としては、試験片の一回転中で断面係数が最小を示し、横穴が鉛直になる姿勢における穴縁の平均応力を用いた。

## 2.3 横穴き裂の観測

SN 曲線の傾斜部の比較的上の方の応力振幅 25 kg/mm<sup>2</sup> と比較的下の方で破断繰返数がほぼ 10<sup>6</sup> サイクルになる応力振幅とで  $\epsilon = 0, 2, 14\%$ 、 $\delta = 1.2, 2.4$  mm の組合わせ条件のおののに対して疲れ試験を行ない、必要なサイクルごとに試験機を止め、試験片を取外して横穴の縁

から発生するき裂を調べた。疲れき裂の長さ、先端付近の硬さ、開閉の幅を光学顕微鏡、微小硬さ計を用いて観測した。開閉の幅を調べるのに必要な曲げモーメントを試験片に与えるために図-2のような静曲げ装置を製作し、使用した。試験片は横穴の軸線がベースの底面に垂直になるようにセンサチャックに取付け、両端のアジャスティングナットを回してフォークエントとベースとの間の締付力を等しく、かつ繰返し曲げモーメントと等しい静曲げモーメントが軸を含むベースの底面に垂直な面内に生じるようにする。かねて平行部の曲げモーメントとの較正がすでにしているセンサチャックに貼付のストレインゲージの出力を観測しながらアジャスティングナットを回すが、この際に静曲げモーメントが繰返しの曲げモーメントを越えないように注意する。

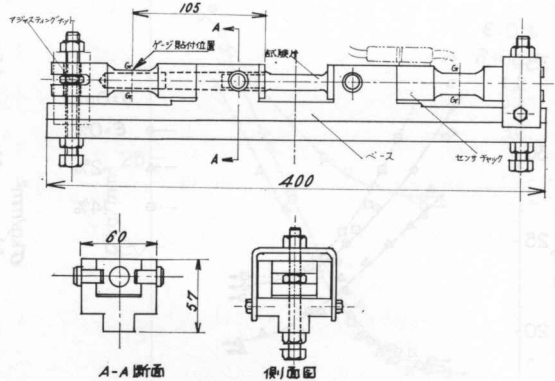


図-2 静曲げ装置

Fig. 2. Static bending apparatus.

き裂の開口幅測定のための標点は、試験片を疲れ試験機から始めて外すときに、き裂が発生した穴縁点から約  $100 \mu$  の母線上、き裂線から左右約  $50 \mu$  の位置に微小硬さ計で圧痕を設けた。このときの荷重は  $50 \text{ gr}$ 、保持時間は  $15 \text{ sec}$  とした。応力振幅を  $\sigma$  とし、静曲げ装置を用いて、表皮応力で  $-\sigma, -\sigma/2, 0, +\sigma/2, +\sigma$  をつぎつぎに作用したときの距離を顕微鏡倍率 400 で観測した。最大の圧縮応力  $-\sigma$  が作用したときの開口幅がもっとも狭く、これを零として、き裂先端からの距離に対する開口幅を求めた。また繰返しを始める前の硬さと各測定回の硬さは微小硬さ計で標点を付けるときに同時に測定した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 SN 曲線

(1)  $\delta$  を一定、 $\varepsilon$  をパラメータとしたとき 図-3 (a), (b), (c), (d) はおのおのの  $\delta$  を一定として、 $\varepsilon$  をパラメータとした SN 曲線である。どの  $\delta$  においても  $\varepsilon=2, 0, 14\%$  の順に時間疲労限、耐久限度がより高くなっている。横穴の大きさに起因する応力分布、応力勾配等が同じなので、この原因は材料の硬さと思われる。図-4 はこの材料の処女材に予引張りを与えたときに、予引張りの程度によって硬さ変わる有様で、処女材に比べて  $2\%$  予ひずみ材では  $6.4\%$  ほど減り、 $14\%$  予ひずみ材では  $14\%$  ほど増している。 $2\%$  程度の子加工の場合は平行部にはリューダースラインを生じている部分とそうでない部分が混在していて、部分によって加工硬化の不均一が内在しており、このために応力の集中を生じ、もとの材料よりかえって弱い抵抗を示し、硬さ計の圧子により、より大きい圧痕を生じ、硬さが低下することになる。これに対

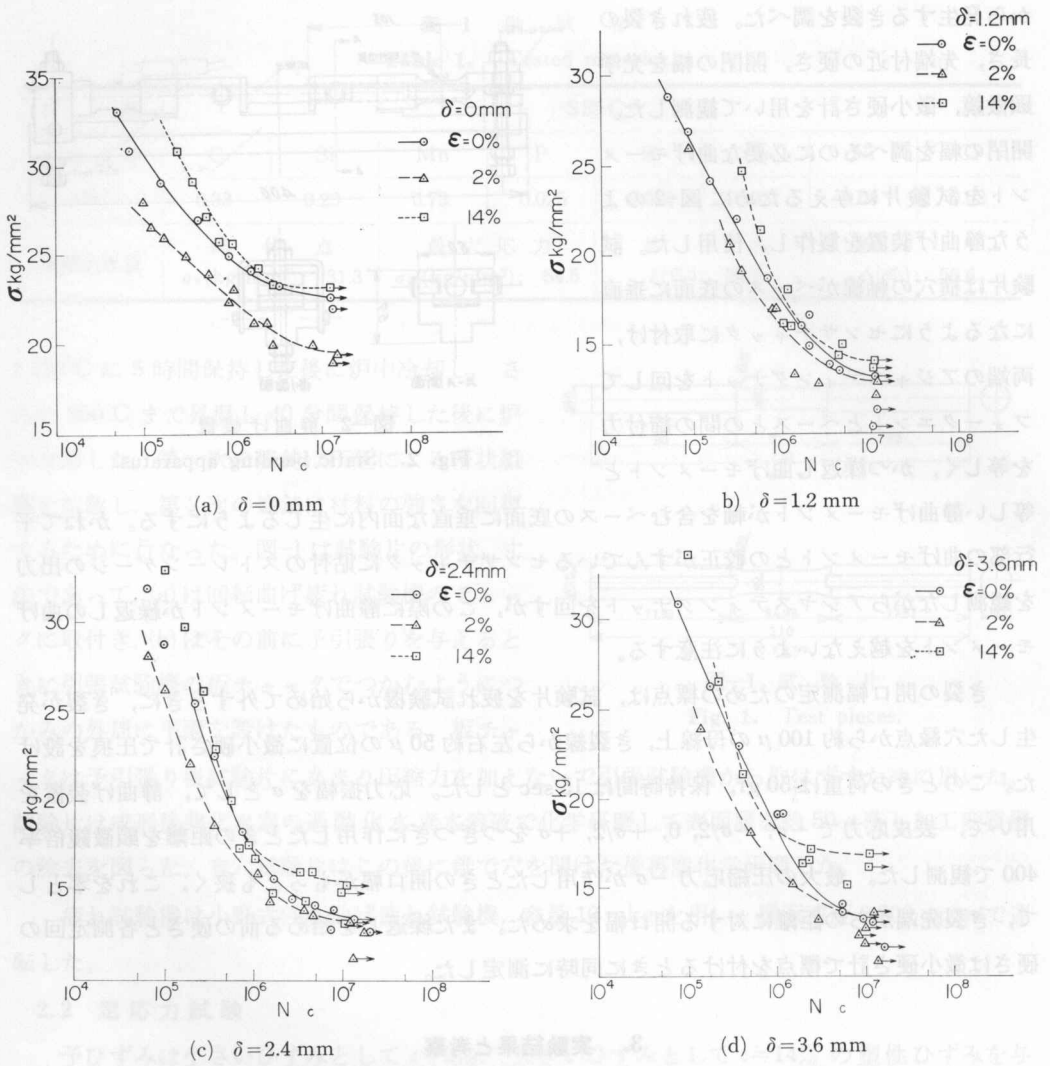


図-3 SN 曲線 ( $\delta$ =一定)  
 Fig. 3. SN curves ( $\delta$ =const.).

して 14% くらいの子ひずみになると、加工硬化がほぼ均一に材料に行きわたり、硬さが増加すると考えられる。図-5 には疲れ試験中に硬さの変化する有様を示した。 $\delta=1.2, 2.4\text{mm}$  の場合で、 $\epsilon$  をパラメータとした。疲れ試験中もおおむね  $\epsilon=2, 0, 14\%$  の順に、より高い硬さを保っているから、疲れ強さもこの順に、より強いと解される。

(2)  $\epsilon$  を一定、 $\delta$  をパラメータとしたとき これ

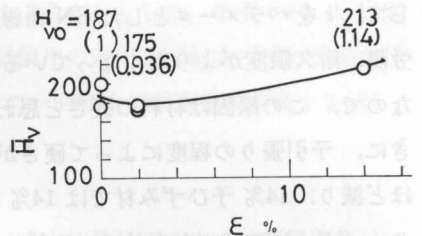


図-4 予加工による硬さの変化  
 Fig. 4. Change of hardness due to pre-straining.

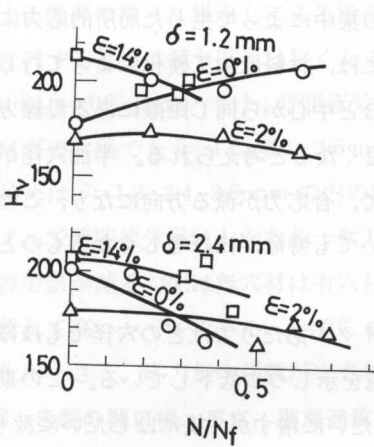
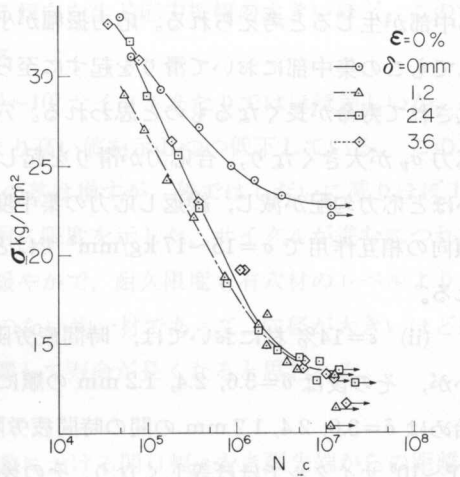
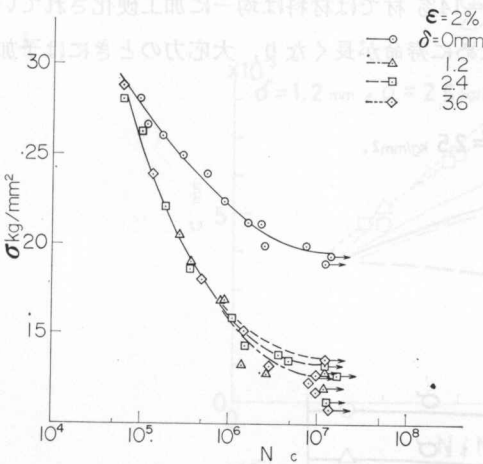


図-5 疲れに伴う硬さの変化

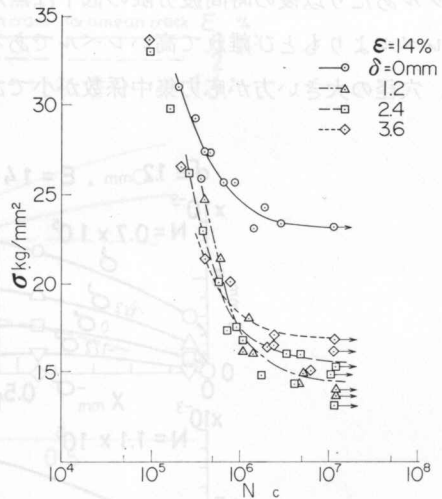
Fig. 5. Change of hardness during fatigue process.



(a)  $\epsilon = 0\%$



(b)  $\epsilon = 2\%$



(c)  $\epsilon = 14\%$

図-6 SN 曲線 ( $\epsilon = \text{一定}$ )

Fig. 6. SN curves ( $\epsilon = \text{const.}$ ).

に対する SN 曲線は 図-6 (a), (b), (c) に示すが、各  $\epsilon$  における  $\delta$  の影響は  $\epsilon$  によって異なるので、各  $\epsilon$  について考察する。

(i)  $\epsilon = 2\%$  においては時間疲労限は  $5 \times 10^4$  サイクルあたりではどの  $\delta$  でもほぼ等しいが、その後は  $\delta = 0$  材は等しい値をとりつつ低下する。  $5 \times 10^5$  サイクルの後には  $\delta = 1.2, 2.4, 3.6 \text{ mm}$  の順にややより高い値を示し、耐久限度もこの順序に、より高くなっている。また時間疲労限の低下は無穴材は有穴材に比べて緩やかで、耐久限度も有穴材のレベルに比べてとび離れて高いレベルにある。  $\epsilon = 2\%$  くらい的时候には加工硬化の不均一を生じ、そのために材料中に応力

集中部が生じると考えられる。応力振幅が小さくてこの集中によって生じた局所的応力に重畳してもこの集中部において滑りを起すに至らないときには、材料は加工硬化によってむしろ強化されて寿命が長くなるものと思われる。穴が大きいほど中心から同じ距離にある母線方向の応力  $\sigma_y$  が大きくなり、合応力が滑りを起し、寿命が短くなると考えられる。半面穴径が大きいほど応力勾配が減じ、繰返し応力の集中度が減るので、合応力が減る方向になり、この増減傾向の相互作用で  $\sigma = 15 \sim 17 \text{ kg/mm}^2$  ではどの  $\varepsilon$  についても寿命がほぼ等しくなるものと思われる。

(ii)  $\varepsilon = 14\%$  材においては、時間疲労限は  $10^5$  サイクルあたりではどの穴径でもほぼ等しいが、その後は  $\delta = 3.6, 2.4, 1.2 \text{ mm}$  の順により高い値を示しつつ低下している。この期間の始めは  $\delta = 3.6, 2.4, 1.2 \text{ mm}$  の間の時間疲労限の差はしだいに増すが、後にはしだいに減り  $5 \times 10^5 \sim 10^6$  サイクルではほぼ等しくなり、その後は時間疲労限は前とは逆に  $\delta = 1.2, 2.4, 3.6 \text{ mm}$  の順により高く、その差を増して行き、耐久限度もこの順序により高くなっている。なお  $10^5$  サイクルあたり以後の時間疲労限の低下は無穴材は有穴材に比べて緩やかで、耐久限度も有穴材のレベルよりもとび離れて高いレベルである。 $\varepsilon = 14\%$  材では材料は均一に加工硬化されていて、穴径の大きい方が応力集中係数が小であるために寿命が長くなり、大応力のときには予加

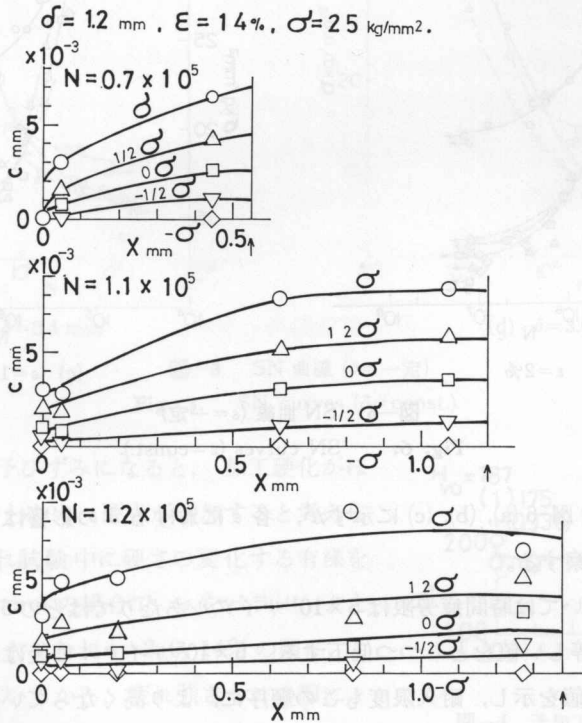


Fig. 7. Crack opening vs. distance from crack top.

工による既存の滑りに繰返しによる滑りを重畳する傾向を生じ応力振幅の大きいほど、このすべりに対する抵抗は減り寿命は短くなると解される。

(iii)  $\varepsilon=0\%$  においては、時間疲労限は  $5 \times 10^4 \sim 10^5$  サイクルあたりではほぼ等しいが、その後はどの穴径でも  $\delta=1.2, 2.4, 3.6$  mm の順により高い値を示しつつ低下している。この期間の始めは  $\delta=1.2, 2.4, 3.6$  mm の内の時間疲労限の差は増すが、後ではしだいに減りほぼ  $10^7$  サイクルで時間疲労限はおおむね一致し、等しい耐久限度を示した。サイクルが進むにつれて時間疲労限が減る勾配は無穴材は有穴材に比べて緩やかで、耐久限度も有穴材のレベルよりもとび離れて高いレベルである。 $\varepsilon=0\%$  材は予加工のない均一材であって、穴径が大きいほど応力勾配が小さく、応力集中係数が小さいことが影響して寿命が長くなると思われる。

### 3.2 き裂の開口幅、長さ、進展速度

(1) き裂開口幅 図-7は疲れき裂の各繰返しにおける開口幅  $c$  をき裂先端からの距離  $x$  に対してプロットした例で、応力振幅を  $\sigma$  として静曲げ応力を  $-\sigma, -1/2\sigma, 0, +1/2\sigma, \sigma$  の5段

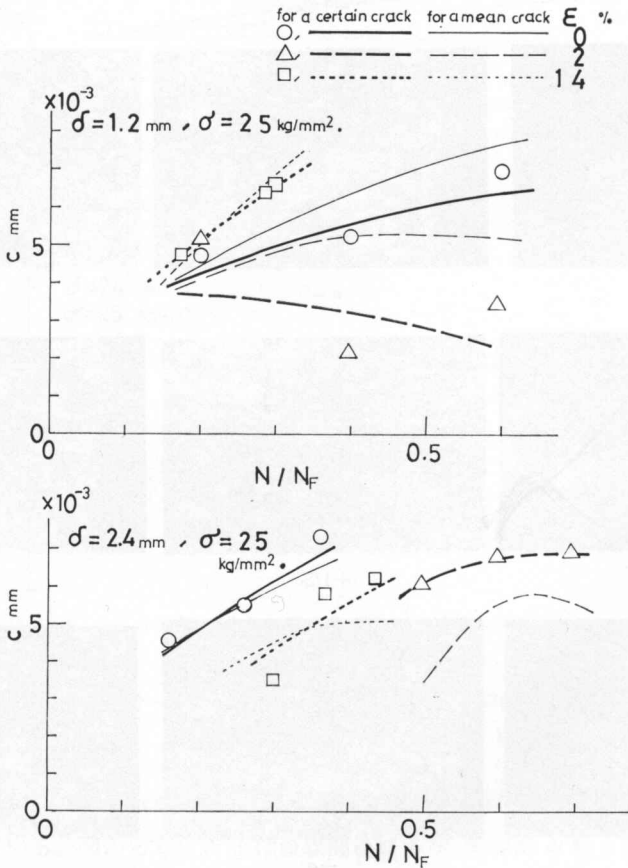


図-8 平均き裂開口幅と繰返し数との関係

Fig. 8. Mean crack opening vs. cycle number.

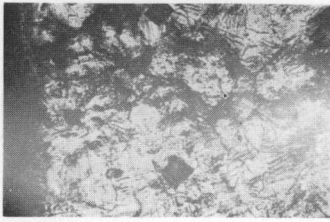
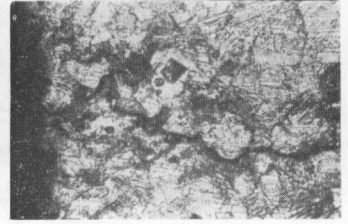
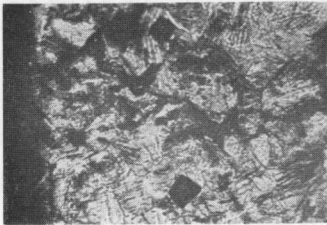
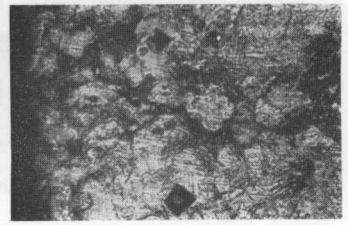
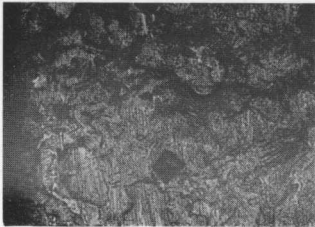
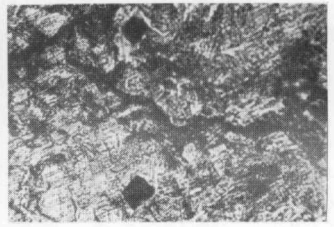
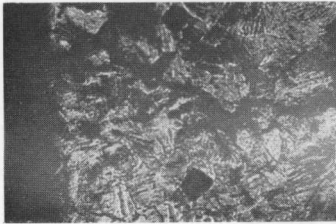
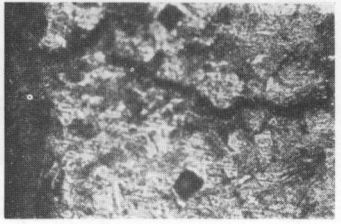
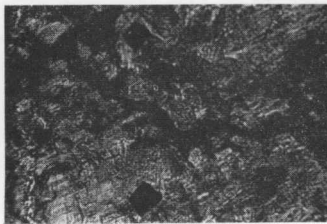
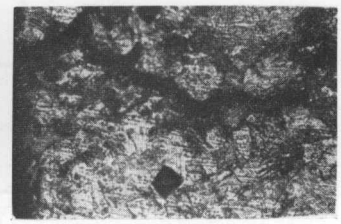
(a)  $N=7 \times 10^4$ (b)  $N=1.1 \times 10^5$ (c)  $N=1.2 \times 10^5$  $-\sigma$  $-\sigma$  $-\sigma$  $-1/2\sigma$  $-1/2\sigma$  $-1/2\sigma$  $\sigma=0$  $\sigma=0$  $\sigma=0$  $+1/2\sigma$  $+1/2\sigma$  $+1/2\sigma$  $+\sigma$  $+\sigma$  $+\sigma$ 

写真-1 き裂開口幅の変化

Photo 1. Change of a crack opening.



階に変化してある。 $c_m$ は $+\sigma$ が作用するときのき裂先端から穴縁までの長さに対する平均開口幅として、 $+\sigma$ の際の曲線の下面積をその長さで除したものであって、図-8は $c_m$ が繰返の進むにつれて変化する有様を示し、 $\varepsilon$ をパラメータとしてある。同じサイクル比 $N/N_F$ では、 $\delta=1.2$  mmの場合は $c_m$ は $\varepsilon=2, 0, 14\%$ の順に、より大きくなり、 $\delta=2.4$  mmのときには $\varepsilon=2, 14, 0\%$ の順に、より大きくなっている。ここで $N_F$ は疲れ破断サイクルである。図-9は平均き裂開口幅 $c_m$ をき裂長さ $l$ に対してプロットしたものである。実線は一個のき裂の場合で、破線は各き裂に対してプロットしたものの平均的な曲線である。写真-1は各繰返数における同じき裂の穴縁の近辺の顕微鏡写真であって、繰返しとともに開口幅がしだい広がる有様がわかる。

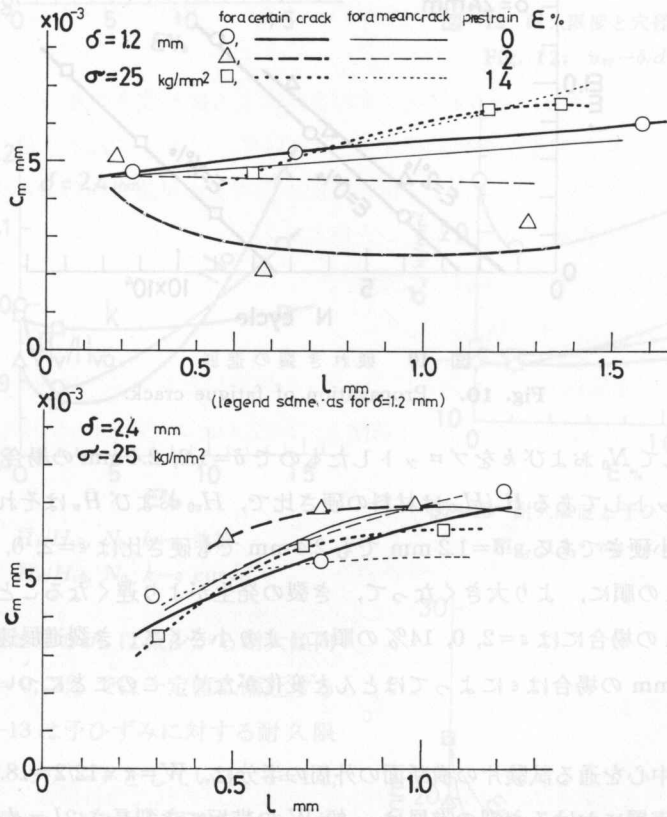


図-9 平均き裂開口幅とき裂長さの関係

Fig. 9. Mean crack opening vs. crack length.

(2) き裂の進展 図-10は一個のき裂の長さを繰返数に対してプロットしたもので、 $\varepsilon$ をパラメータとしている。図から $l$ と $N$ とは直線関係にあり、直線が $N$ 軸と交わる座標 $N_0$ はき裂発生サイクルといえる。直線の勾配を $k$ とすると

$$l = k(N - N_0), \quad dl/dN = k \quad (1)$$

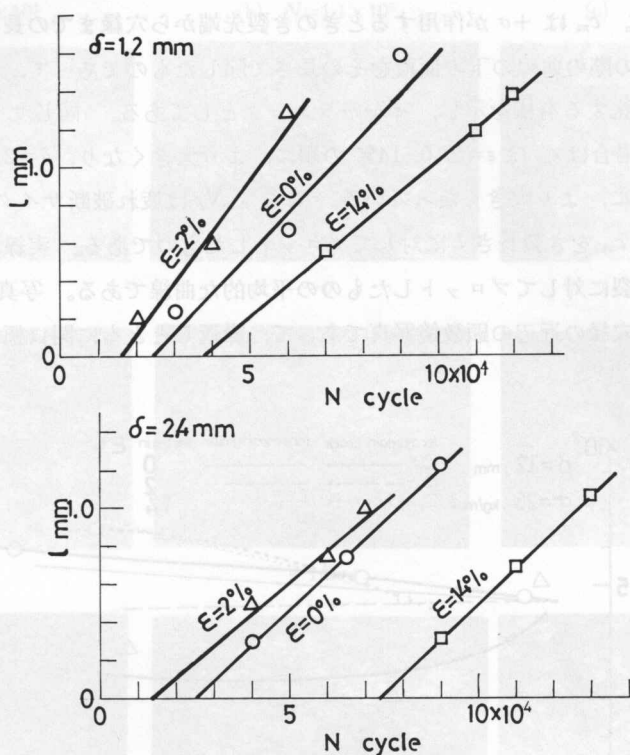


図-10 疲れき裂の進展

Fig. 10. Propagation of fatigue crack.

図-11は $\epsilon$ に対して $N_0$ および $k$ をプロットしたもので $\delta = 1.2, 2.4 \text{ mm}$ の場合である。このほかに同図にプロットしてある $\bar{H}_v/H_{v0}$ は材料の硬さ比で、 $H_{v0}$ および $\bar{H}_v$ はそれぞれ予引張りの前および後の微小硬さである。 $\delta = 1.2 \text{ mm}$ でも $2.4 \text{ mm}$ でも硬さ比は $\epsilon = 2, 0, 14\%$ の順に、より高く、 $N_0$ もこの順に、より大きくなって、き裂の発生がより遅くなることを示している。 $k$ は、 $\delta = 1.2 \text{ mm}$ の場合には $\epsilon = 2, 0, 14\%$ の順に、より小さくて、き裂進展速度が減ることを示すが、 $\delta = 2.4 \text{ mm}$ の場合は $\epsilon$ によってほとんど変化がなく、このことについてはさらに調べたい。

いま横穴の中心を通る試験片の横断面の外周の半分は、 $W = \pi \times 12/2 = 18.8 \text{ mm}$ であるが、この円周に沿う表層におけるき裂の進展は、幅 $W$ の帯板にき裂長さ $2L = d + l$ が生じている場合で、 $\delta = 1.2 \text{ mm}$ 、 $\epsilon = 0 \sim 14\%$ では $l = 0.4 \sim 3 \text{ mm}$ であるから、 $W/L = 0.0425 \sim 0.111$ となる。Weibull<sup>7)</sup>やRolfe and Munse<sup>8)</sup>は実験を行なって、 $W \ll L$ の場合には、 $dl/dN = \text{const.}$ と考えてよいといっているが、横穴材の場合も実験により式(2)が求められたので、この結論に裏付けを与えたといえる。

(3) 耐久限度 図-12は直径比 $\delta/d$ に対して耐久限度 $\sigma_w$ をプロットしたもので、 $\epsilon$ をパラメータとする。どの $\delta/d$ でも、 $\epsilon = 2, 0, 14\%$ の順に $\sigma_w$ はより大きくなっている。 $\epsilon = 14\%$

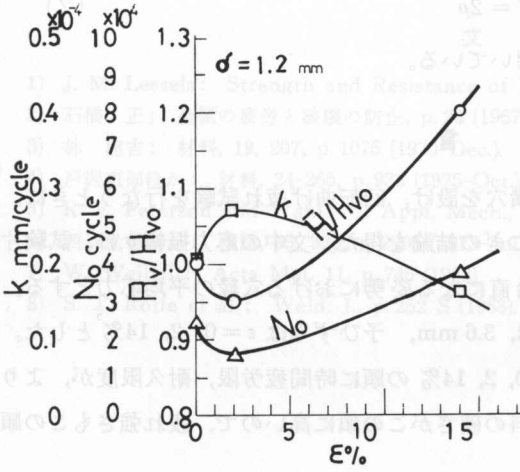


図-11  $\bar{H}_v/H_{v0}$ ,  $N_0$ ,  $k$ - $\epsilon$  曲線

Fig. 11.  $\bar{H}_v/H_{v0}$ ,  $N_0$ ,  $k$ - $\epsilon$  curve.

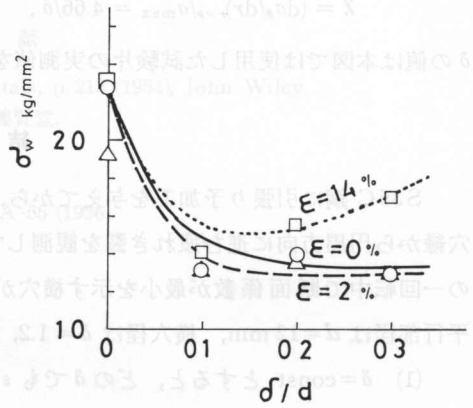
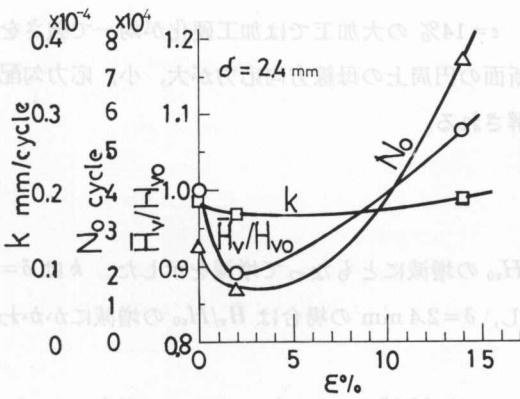


図-12 耐久限度と穴径比との関係

Fig. 12.  $\sigma_w$ - $\delta/d$  curve.

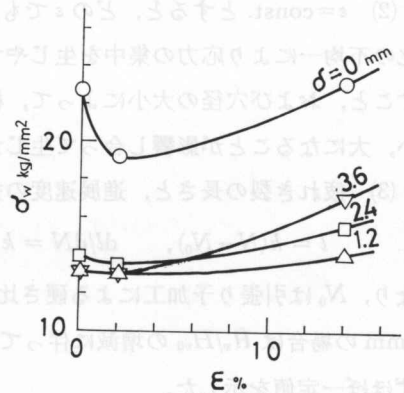


図-13 耐久限度と予ひずみとの関係

Fig. 13.  $\sigma_w$ - $\epsilon$  curve.

では  $\delta/d=0.16$  あたりで  $\sigma_w$  は減少から増大傾向に転じている。 $\epsilon=0, 2\%$  では一定値に漸近する傾向になる。図-13 は予ひずみに対する耐久限度の変化で、 $\delta$  をパラメータとしている。 $\delta=1.2, 2.4, 3.6, 0$  mm の順に、より耐久限度が大きくなっていることがわかる。図-14 は穴縁における応力勾配  $\chi$  に対する耐久限度の変化を示し、 $\chi$  が小さければ  $\sigma_w$  は大きくなり、 $\chi$  は上の  $\delta$  の順に、より小さいので、図-13 と図-14 との関係が見られるのである。丸穴を有する無限板を引張る場合をこの回転曲げの場合に準用すると、

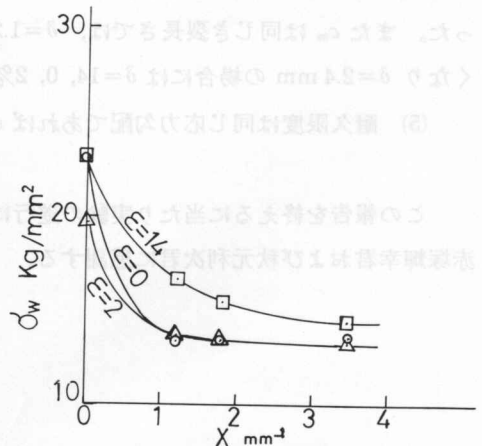


図-14 耐久限度と応力勾配との関係

Fig. 14.  $\sigma_w$ - $\chi$  curve.

$$\lambda = (d\sigma_\theta/dr)_{r=\rho}/\sigma_{\max} = 4.66/\delta, \quad \delta = 2\rho \quad (2)$$

$\delta$  の値は本図では使用した試験片の実測値を用いている。

## 結 言

S35C 鋼に引張り予加工を与えてから、横穴を設け、回転曲げ疲れ試験を行なうときに、穴縁から円周方向に進む疲れき裂を観測してつぎの結論を得た。文中の応力振幅  $\sigma$  は、試験片の一回転中で断面係数が最小を示す横穴が鉛直になる姿勢における穴縁の平均応力とする。平行部径は  $d=12$  mm、横穴径は  $\delta=1.2, 2.4, 3.6$  mm、予ひずみは  $\varepsilon=0, 2, 14\%$  とした。

(1)  $\delta=\text{const.}$  とすると、どの  $\delta$  でも  $\varepsilon=0, 2, 14\%$  の順に時間疲労限、耐久限度が、より高くなった。これは予加工によって増した材料の硬さがこの順に高いので、疲れ強さもこの順により高くなったと思われる。

(2)  $\varepsilon=\text{const.}$  とすると、どの  $\varepsilon$  でも、 $\delta$  の違いによる疲れ強さの違いは、 $\varepsilon=2\%$  では加工硬化の不均一により応力の集中を生じやすく、 $\varepsilon=14\%$  の大加工では加工硬化が均一で強さを増すこと、および穴径の大小によって、横穴断面の円周上の母線方向応力が大、小、応力勾配が小、大になることが影響し合って生じたと解される。

(3) 疲れき裂の長さ  $l$  と、進展速度の式は、

$$l = k(N - N_0), \quad dl/dN = k$$

となり、 $N_0$  は引張り予加工による硬さ比  $\bar{H}_v/H_{v0}$  の増減にともなって増減を示した。 $k$  は  $\delta=1.2$  mm の場合は  $\bar{H}_v/H_{v0}$  の増減に伴って減増し、 $\delta=2.4$  mm の場合は  $\bar{H}_v/H_{v0}$  の増減にかかわらずほぼ一定値を示した。

(4) 疲れき裂の平均開口幅  $c_m$  は同じサイクル比  $N/N_F$  では、 $\delta=1.2$  mm の場合は  $\varepsilon=2, 0, 14\%$  の順に、より大きくなり、 $\delta=2.4$  mm のときは  $\varepsilon=2, 14, 0\%$  の順に、より大きくなった。また  $c_m$  は同じき裂長さでは、 $\delta=1.2$  mm の場合には  $\varepsilon=2, 0, 14\%$  の順に、より大きくなり  $\delta=2.4$  mm の場合には  $\varepsilon=14, 0, 2\%$  の順に、より大きくなった。

(5) 耐久限度は同じ応力勾配であれば  $\varepsilon=2, 0, 14\%$  の順に、より大きくなった。

この報告を終えるに当たり実験の遂行に多大の協力をされた当時機械工学科四年目学生、赤塚輝幸君および秋元利次君に感謝する。

## 電子計算機による多変数系一括自動操作の

- 1) J. M. Lessels: Strength and Resistance of Metals, p. 213 (1954), John Wiley.
- 2) 石橋 正: 金属の疲労と破壊の防止, p. 23 (1967), 養賢堂.
- 3) 林 建吉: 材料, **19**, 207, p. 1075 (1970-Dec.).
- 4) 戸梶恵郎ほか: 材料, 24-265, p. 933 (1975-Oct.).
- 5) R. E. Peterson and Wahl: J. Appl. Mech., **3**, A-55 (1936).
- 6) 西谷弘信ほか: 機論, **39**, 323, p. 2205 (1973-Jul.).
- 7) W. Weibull: Acta Met. **11**, p. 745 (1963).
- 8) S. T. Rolfe et al.: Weld. J., p. 252 S (1963).

A Method of Automatic Fault Recovery with  
Digital Computer in Power System

by Koichi NARA and Toshihiko TANI

In a power system it is essential to recover a fault as quickly as possible after it is committed. So, many trials for automatic fault recovery have been done today. But each of them was done by a device for exclusively special power system configuration.

In this paper, we propose a method of automatic fault recovery system having a digital computer, which operates many substation's apparatus simultaneously independent of power system's configuration by scanning the apparatus which shall be operated, and by judging the predecided condition of operation automatically.

The proposed method makes it easy to maintain software caused by adding and changing apparatus which constitute substations.

## 1. ま え が き

電力系統に事故が発生すると、系統に過負荷、周波数変動、電圧異常等を生じ、場合によっては停電に至る。過負荷や周波数変動、電圧異常については、それ相応の高速な処理が要求され、それに対する種々の装置が実用に供されている。停電に至った場合には一刻も早い復旧のために要求され、従来から、事故時操作の高速化・自動化が検討され、一部実用に供されている。電力系統における事故時自動復旧操作は、従来、特定の送電網毎に設置される復旧操作手順を内蔵した自動復旧装置によってなされてきており、近年、電子計算機の普及に伴って、一部に電子計算機またはマイクログループコンピュータを利用してこのような自動化が実施されてきている。

電子計算機を系統操作に導入した場合、多変数電網、大量データの処理が容易になる

\* 昭和51年電気学会全国大会、第19回自動制御研究会講演会(昭和51年11月)で発表

\*\* 北陸工業大学電気工学科

\*\*\* 三菱電機株式会社電力系統システム部