

# 琉球大学学術リポジトリ

単一過大荷重を負荷した鋭い切欠きを有する試験片から発生するき裂の進展評価

メタデータ	言語: 出版者: 日本機械学会 公開日: 2007-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): Fatigue, Crack Propagation, Crack Closure, Overload, Notch, Stress Intensity Factor 作成者: 真壁, 朝敏, 才本, 明秀, 福里, 真吾, 宮崎, 達二郎 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/136">http://hdl.handle.net/20.500.12000/136</a>

## 単一過大荷重を負荷した鋭い切欠きを有する 試験片から発生するき裂の進展評価\*

真翼 朝 敏<sup>\*1</sup>, Anindito PURNOWIDODO<sup>\*2</sup>, 才本 明 秀<sup>\*3</sup>  
福里 真 吾<sup>\*4</sup>, 宮崎 達 二郎<sup>\*1</sup>

### Evaluation of Crack Growth in Overloaded Specimen with Sharp Notch

Chobin MAKABE<sup>\*5</sup>, Anindito PURNOWIDODO, Akihide SAIMOTO,  
Singo FUKUZATO and Tatsujirou MIYAZAKI

\* Department of Mechanical Systems Engineering, University of the Ryukyus,  
1 Senbaru, Nishihara-cho, Nakagami-gun, Okinawa, 903-0213 Japan

A simple method of evaluating the crack propagation rate of a specimen with sharp notch by using an effective stress intensity factor range was proposed. This study also had a special purpose of evaluating the crack propagation after overload. A 6 mm long U shaped notch was cut in the center section of the specimen. The notch root radius  $\rho$  was chosen as 0.1 mm and 1 mm. These were regarded as center notched specimens. The crack propagation behavior of these specimens was compared with a center cracked specimen. Push-pull fatigue tests were carried out under stress ratios  $R = 0, -1$ , and  $-1.5$ . After overload, retardation of crack growth was observed under  $R = 0$  and  $-1$  in the cases of the notched specimen and center cracked specimen. However, where  $R = -1.5$ , the acceleration of crack growth was observed after overload in both types of specimens. Even though crack growth was accelerated or decelerated, the rate was able to be evaluated by effective stress intensity factor range. The effective stress intensity factor range of the center cracked specimen could also be applied to that of the notched specimen with  $\rho = 0.1$  mm and 1 mm.

**Key Words:** Fatigue, Crack Propagation, Crack Closure, Overload, Notch, Stress Intensity Factor

## 1. 結 言

Haddad<sup>(1)</sup>, Tanaka と Nakai<sup>(2)</sup>によって切欠きから発生した短いき裂の進展について評価がなされ、さらに、切欠きから発生したき裂に対する応力拡大係数の算出手法に関して検討がなされている。また、西谷と尾田<sup>(3)</sup>は半無限板において切欠きからき裂が発生・進展した場合、どの程度き裂が進展したら、その切欠きの長さを含めたき裂の長さが縁き裂の長さと同値とみなせるのかについて議論している(その場合、切欠き長さとき裂長さの和で評価した長さを等価き裂長さと呼んでいる)。以上のような、切欠きから発生したき裂や等価き裂長さに対する応力拡大係数の算出に関する検討は疲労き裂の進展挙動を実用的な観点から評価する場合にも有用であると思われる。本研究においても、切欠きから発生したき裂の応力拡大係数を、等価き裂長さを用いて近似的に算出し、その応力拡大係数を用いてき裂進展速度が簡便に評価できるのかどう

かについて検討した。また、本研究では、平板部を有する試験片の中央に切欠き先端の半径が小さなU字形切欠きを加工した場合、どの程度のき裂進展によりその試験片が中央き裂試験片とみなせるのかについて検討した。

著者ら<sup>(4)(5)</sup>は単一過大荷重を負荷した後の中央き裂試験片のき裂進展に関する検討を行った。それらの結果では、き裂先端が過大過重負荷後に鈍化してもき裂進展速度は有効応力拡大係数範囲を用いて整理できた。本研究では、特にそれらの結果と関連させて、単一過大荷重を負荷した後の中央切欠き試験片におけるき裂進展挙動に着目した検討を行った。また、基礎実験として、き裂試験片のき裂進展試験を切欠き試験片で代用して行う際に、切欠き試験片をき裂試験片とみなして差し支えない限界の切欠き寸法がわかっていれば有益であり、き裂閉口挙動とき裂進展挙動の関係を鋭い切欠きを持つ試験片とき裂試験片の場合で比較することも興味深いことと思われる。

## 2. 素材および実験方法

素材の低炭素鋼 S15CK を 900°C で 1 時間焼きなましして試験片を製作した。表 1 と表 2 にそれぞれ素材

\* 原稿受付 2005年4月28日。

<sup>\*1</sup> 正員、琉球大学工学部(☎903-0213 沖縄県中頭郡西原町字1)。

<sup>\*2</sup> Mech. Eng. Dept., Brawijaya Univ. (Jl. MT. Halang, East Java, Indonesia)。

<sup>\*3</sup> 正員、長崎大学工学部(☎852-8521 長崎市文教町1-14)。

<sup>\*4</sup> 沖縄電力(株)(☎901-2602 浦添市牧港5-2-1)。

E-mail: makabe@tec.u-ryukyuu.ac.jp

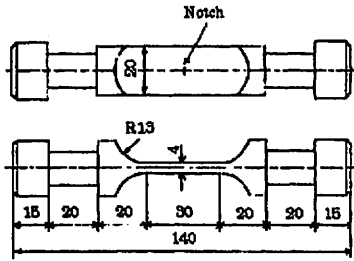
の化学成分と機械的性質を示す。図1に試験片形状を示す。試験部中央に加工したU字形切欠きの長さ  $2t$  は6mmに固定した。切欠き先端半径  $\rho$  は0.1mmと1mmに選定し、特に、 $\rho$ が1mmの場合を主として検討した。切欠き長さを6mmにした理由は前報<sup>(6)</sup>の中央き裂試験片の場合と本実験の切欠き試験片の場合のき裂進展挙動を比較検討するためである。試験片表面はエメリー紙とアルミナを主成分とした研磨剤で鏡面に仕上げ、600°Cで1時間、真空焼きなましをした後に実験に供した。疲労試験

Table 1 Chemical composition (wt.%).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Fe
0.15	0.30	0.50	0.013	0.013	0.05	Bal

Table 2 Mechanical properties ( $\sigma_y$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_t$  and  $\phi$  are yield strength, tensile strength, true fracture stress and reduction of area, respectively).

$\sigma_b$ , MPa	$\sigma_t$ , MPa	$\sigma_y$ , MPa	$\phi$ , %
283	449	956	69



(a) Geometry of the specimen (mm).

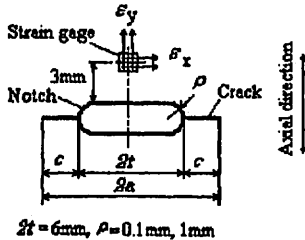
(b) Notch shape. (Stress concentration factors  $\alpha$  (= maximum stress / net stress) for  $\rho=0.1$ mm and 1mm are 9.35 and 3.48, respectively).

Fig. 1 Geometry of specimen and notch.

Table 3 Testing conditions of notched specimens

$\rho$ mm	R	$S_{max}$ MPa	$S_{OL}$ MPa	%Overload %
0.1	0	86	178	107
1.0	0	86	-	-
1.0	0	86	178	107
0.1	-1.0	67	178	83
1.0	-1.0	67	-	-
1.0	-1.0	67	178	83
0.1	-1.5	67	178	66
1.0	-1.5	67	-	-
1.0	-1.5	67	178	66

は電気油圧制御方式の試験機を用いて引張・圧縮方式、周波数 10Hz で行った。表3に中央切欠き試験片を用いて行った本実験の条件を示す。繰返し最小応力  $S_{min}$  と最大応力  $S_{max}$  の比で定義される応力比  $R$  ( $=S_{min}/S_{max}$ ) は-1.5、-1.0そして0の3種類とした。%Overload<sup>(6)</sup>は次式で定義した。

$$\%Overload = (S_{OL} - S_{max}) / S_{max} \times 100 \%$$

ここで、 $S_{OL}$ は過大応力である。前報<sup>(6)</sup>の中央き裂試験片では、 $S_{OL}=178$ MPaとした場合、 $R=0$ と-1.0ではき裂進展の遅延が生じた。しかし、 $R=-1.5$ においてはき裂進展の遅延が生じず、逆に加速する結果となった。そのような結果と比較するために本研究の切欠き試験片でも  $S_{OL}$ の値は 178MPa に選んでいる。切欠き試験片における過大荷重の負荷は疲労き裂進展試験を行う直前に行った。前報<sup>(6)</sup>の中央き裂試験片の場合ではき裂進展試験の途中においてき裂長さ  $2a$ が6mmに達した際に試験を中断して手動により過大荷重を負荷したので、本実験の切欠き試験片でも過大荷重は手動により負荷した。また、有効応力拡大係数範囲  $\Delta K_{eff}$ を算出するためにき裂開口点  $S_p$ を除荷弾性コンプライアンス法<sup>(7)</sup>で測定した。その測定には図1(b)に示した位置に貼り付けたひずみゲージを用いた。

切欠き底からのき裂の発生と進展は金属顕微鏡によって直接観察し、ダイヤルゲージを用いてき裂長さを測定した。その測定精度は0.01mmである。き裂長さの測定は各実験で定めた繰返し数毎に行った。切欠き底から測定したき裂の進展量  $c$ が0.5mm以下の場合、測定時のき裂長さの増分  $\Delta c$ は0.02mmか

ら 0.1mm の範囲で変化し、 $c$  が 1mm 以上の場合、 $\Delta c$  は 0.2mm 以上となった。 $c$  が 0.5mm から 1mm の間では、 $\Delta c$  はほぼ 0.1mm から 0.2mm の範囲の値となった。また、最小二乗法を用いてき裂進展曲線を局所的に 2 次式で近似し、近似区間毎の中間点で、き裂進展速度を算出した。応力拡大係数もその点におけるき裂長さをを用いて算出した。

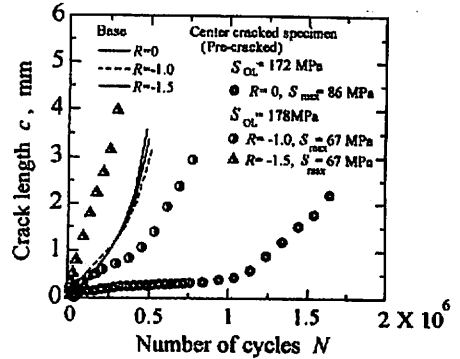
なお、過大応力  $S_{OL}=178\text{MPa}$  を負荷した際の中央き裂試験片、 $\rho=0.1\text{mm}$  と 1mm の中央切欠き試験片における、き裂先端あるいは切欠き先端のおよその塑性域寸法（荷重軸に垂直方向の寸法）は、それぞれ、0.9mm、0.9mm、0.8mm となった（有限要素法を用いて、弾性係数を 206GPa、加工硬化係数を 0.26、降伏応力を 283MPa として平面応力条件で算出）。

### 3. 実験結果および考察

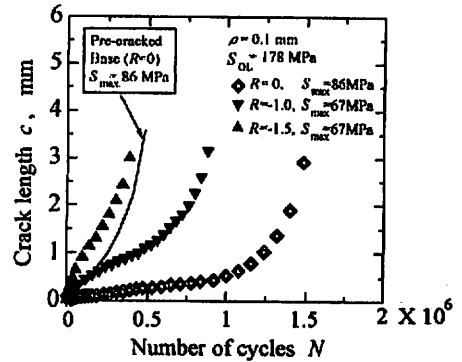
3・1 き裂進展挙動について 切欠き底からき裂が発生する寿命は、応力比  $R$  と切欠き半径  $\rho$  の影響を受け、応力比  $R$  が 0、切欠き半径  $\rho$  が 1mm の場合には、過大荷重を負荷しなかった場合においても負荷した場合においてもき裂が発生し難く、繰返し最大応力 ( $S_{max}=86\text{MPa}$ ) を  $1 \times 10^6$  回以上、負荷してもき裂が発生しなかった。その場合には、応力比  $R=-1$  のもとで予き裂を発生させた。その条件は、繰返し最大応力  $S_{max}$  をき裂進展試験の場合の 0.6 倍程度とし、片側で長さが約 0.05mm のき裂が発生したことを確認した後に、応力比  $R$  が 0 の実験を実施した。本研究では、このような  $R=0$  でのき裂発生の問題から、特にき裂発生には注目せず、前報<sup>(4)</sup>の中央き裂試験片の結果と関連づけて切欠き試験片の過大荷重負荷後のき裂進展挙動について検討した。

図 2 にき裂進展曲線を示す。これらは、き裂発生に要する応力の繰返し数を除いたものであり、切欠き先端から測定した片側でのき裂進展量  $c$  を縦軸にとって整理してある（本研究では、顕微鏡によるき裂長さの測定精度と明瞭にき裂が観察できる長さを考慮して、き裂長さが 0.05mm に達した時点なき裂発生と定義した）。また、中央き裂試験片では過大荷重負荷前にすでにき裂を発生させてあり、予き裂試験片とみなせるので、そのデータは図中に Pre-cracked として示してある。図 2(a), (b), (c) はそれぞれ中央き裂の場合、切欠き先端の半径  $\rho$  が 0.1mm と 1mm の中央切欠きの場合である。

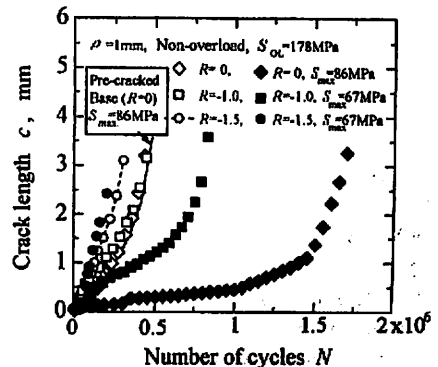
図 2(a) の中央き裂の場合は中央切欠きの場合との比較のため、前報<sup>(4)</sup>の結果を示したものである。図



(a) Center cracked specimens (initial half crack length  $a_0=3\text{mm}$ ).



(b)  $\rho=0.1\text{mm}$ ,  $t=3\text{mm}$ .



(c)  $\rho=1\text{mm}$ ,  $t=3\text{mm}$ .

Fig. 2 Crack propagation curves

2(a)において実線、破線、一点鎖線で示したき裂進展曲線は過大荷重を負荷していない中央き裂の場合の基本データ (Base) である。この場合、 $R=0$  における  $S_{max}$  の値は 86MPa である。また、 $R=-1.0$  と  $R=-1.5$  における  $S_{max}$  の値は 67MPa としたが、これらのき裂進展曲線は各  $R$  値の場合でほぼ一致している。過大荷重負荷後には、 $R$  が 0 と -1.0 の場合ではき裂進展の遅延が生じているが、 $R=-1.5$  の場合ではき裂進展の遅延が生じていないことがわかる。なお、図 2(a)の縦軸は過大荷重を負荷した直後からのき裂進展量  $c$  を示したものである。

図 2(b), (c)は、中央切欠きの場合における過大荷重負荷後のき裂進展曲線である。これらの図においては、比較のために中央き裂における  $R=0$  の過大荷重を負荷しない場合 (Base) のき裂進展曲線も実線で示してある (中央き裂の場合の Base における本実験でのき裂進展傾向は、 $R$  の違いによらず、ほとんど一致していたので、 $R=0$  の場合のみを示してある)。図 2(b)は切欠き半径  $\rho=0.1$ mm における過大荷重を負荷した場合の結果である、図 2(a)と図 2(b)との比較から  $\rho=0.1$ mm の場合におけるき裂進展の加速と遅延の傾向は中央き裂の場合とほとんど同じであることがわかる。図 2(c)の  $\rho=1$ mm の場合は過大荷重を負荷した場合と負荷しない場合の両方について検討した。過大荷重を負荷しない場合は、 $R=-1.5$  の場合以外は切欠きの場合も中央き裂の Base の場合とほぼ同じき裂進展傾向を示している。そして、過大荷重を負荷した場合のき裂進展挙動は、 $\rho=1$ mm の場合でも中央き裂の場合の傾向とほとんど変わらないことがわかる。

3.2 切欠きから発生したき裂の進展速度と応力拡大係数の関係について 本実験で用いた試験片の場合に対応させて、上下端部で一緒に引張られた、板幅  $2W=20$ mm、軸方向長さ  $2L=30$ mm の U 字形切欠きを有する平板試験片について、切欠き半径  $\rho$  を種々の寸法に変化させた場合の切欠きから発生したき裂における応力拡大係数の変化について検討した。また、中央切欠きから発生するき裂の応力拡大係数  $K_{II}$  がどのように中央き裂の応力拡大係数  $K_I$  に対して変化するのかを検討するため、それらの比  $F'$  ( $=K_{II}/K_I$ ) の変化傾向をき裂進展量  $c$  に対して整理した。中央切欠きから進展したき裂の  $K_{II}$  の計算には西谷ら<sup>(8)</sup>によって開発された 2 次元汎用体積力法のプログラムを用い、中央き裂の  $K_I$  の計算には Tada の式<sup>(9)</sup>を用いた。その結果を図 3 に示す。図 3(a)は切欠き長さ  $2a$  が 6mm (本実験の場合) につ

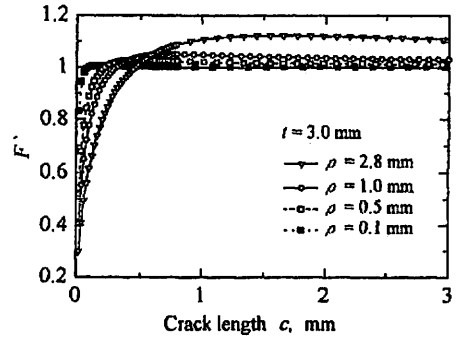
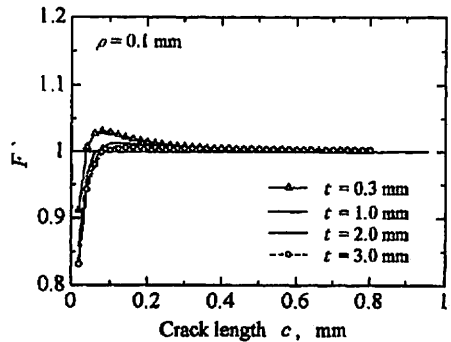
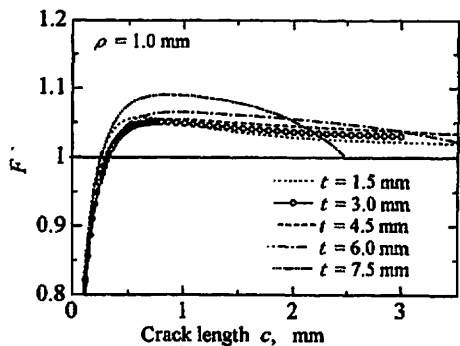
(a) In the case of  $t=3$ mm.(b) In the case of  $\rho=0.1$ mm.(c) In the case of  $\rho=1$ mm.

Fig. 3 Variation of ratio of stress intensity factor for a crack initiated from notch to that for a center crack, in the case of a finite plate.

いての結果である。切欠き半径  $\rho$  が 1mm 以下であると、切欠き先端からき裂が 0.2mm 程度以上に進展した場合、切欠きから進展したき裂と中央き裂の

応力拡大係数の比  $F'$  の分布から、両者における誤差は 5% 以下になっていることがわかる。また、図 3(b) の結果から、切欠きから発生したき裂の進展量  $c$  が 0.1mm 以上なら、切欠き半径  $\rho$  が 0.1mm 以下、切欠き半長  $l$  が 1mm 以上の切欠きを有する中央切欠き試験片は近似的に中央き裂試験片とみなして応力拡大係数を算出して差し支えないことがわかる。図 3(c) は  $\rho$  が 1mm の場合であり、切欠き半長  $l$  が 4.5mm 以下ならば、切欠きからき裂が 0.2mm 程度進展したら、 $F'$  の値はほぼ 0.95 から 1.05 の範囲内にあるので、実用的にはそれらの切欠きから 0.2mm 以上のき裂進展が生じるとそれらは中央き裂試験片とみなして差し支えないことが考察される。

なお、本実験で用いた試験片に対応する、切欠き半径  $\rho=1\text{mm}$ 、切欠き半長  $l=3\text{mm}$  の場合について検討すると、き裂進展量  $c$  が 0.2mm 以下なら、図 3(c) に示した  $F'$  の分布から、応力拡大係数は中央き裂試験片に対する式<sup>9)</sup>で近似した場合の方が体積力法<sup>8)</sup>で算出した場合よりも高くなり、両者の誤差は 10% 以上になる。

前報<sup>9)</sup>において、き裂半長  $a=3\text{mm}$  の中央き裂を有する試験片に  $S_{OL}=178\text{MPa}$  の過大応力を負荷した場合は、き裂先端が鈍化し、その際のき裂先端近傍でのき裂開口変位は約  $30\mu\text{m}$  であった。図 3 の応力拡大係数の分布から検討すると、切欠き半径  $\rho$  が 0.1mm 以下ならば、き裂進展量  $c$  が 0.1mm に達すると、半長が  $a=3\text{mm}$  のき裂に対応する  $l=3\text{mm}$  の切欠き試験片においては  $F'$  の値がほぼ 1 となる。このことから、前報<sup>9)</sup>のようなレベルでき裂の鈍化や開口が生じて、き裂がその開口変位に相当する長さ以上に進展すれば、応力拡大係数を算出する際には、き裂開口の影響を考慮する必要はないと考えられる。しかしながら、き裂進展速度はき裂先端での塑性域の発達等に関連したき裂開口挙動や応力振幅の変化等の影響を受けて変動する。その場合、き裂進展速度は有効応力拡大係数範囲を用いて評価するのが一般的になっており、変動荷重下のき裂進展速度も有効応力拡大係数範囲  $\Delta K_{eff}$  を用いれば合理的に整理できることが示されている<sup>10)</sup>。

以上のようなことに基づき、本報告では、鋭い切欠きを有する中央切欠き試験片のき裂進展速度が、中央き裂試験片と仮定して算出した  $\Delta K_{eff}$  を用いて実用上の精度で評価できるか否かについて検討した。そのために、除荷弾性コンプライアンス法<sup>11)</sup>によってき裂開口点  $S_p$  を測定した。中央切欠き試験片における  $S_p$  と  $c$  の関係を図 4 に示す (比較のため、

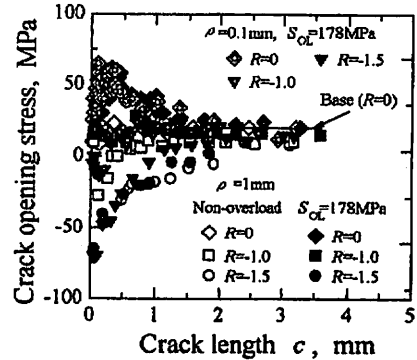
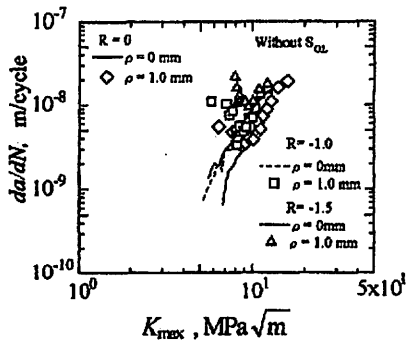


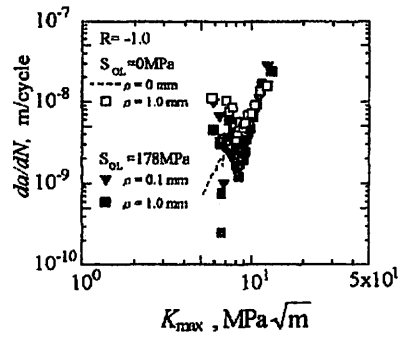
Fig. 4 Variation of crack opening stress during crack growth.

過大荷重を負荷していない中央き裂試験片の Base の結果も示してある)。良く知られているように、き裂の進展に伴いき裂開口点  $S_p$  が低下した際には、き裂進展速度  $da/dN$  (または  $dc/dN$ ) は加速し、き裂開口点  $S_p$  が上昇していくと  $da/dN$  は減速する。図 4 から  $R$  が 0 の場合は、用いた切欠き形状によらず、ほとんど全範囲で過大荷重負荷後のき裂開口点  $S_p$  は、中央き裂試験片の Base の場合よりも高い値となっていることがわかる。また、逆に、 $R=-1.5$  の場合においては、切欠き試験片のき裂開口点  $S_p$  は過大荷重負荷後にはほぼ全範囲で Base の場合よりも低い値になっていることがわかる。この傾向は、前報<sup>9)</sup>で示した過大荷重を負荷した後における中央き裂試験片のき裂開口点  $S_p$  の変化傾向と同じである。したがって、き裂開口挙動はき裂前方に分布する残留応力が関係することから、前報<sup>9)</sup>に記したような機構で過大荷重負荷後のき裂進展挙動への応力比  $R$  の依存性が生じていることが考察される。つまり、本実験の中央切欠き試験片においても中央き裂試験片の場合と同様に、過大荷重負荷後にき裂前方に分布する残留応力は、 $R=0$  の場合は圧縮応力であり、 $R=-1.5$  の場合は引張り応力であることがき裂開口点  $S_p$  の変化から考察される。そのような残留応力の分布が、図 2 に示したき裂進展曲線に反映していると考えられる。

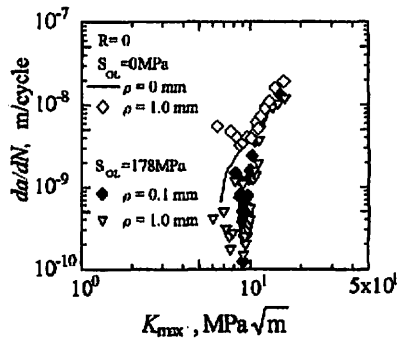
図 5 にき裂進展速度  $da/dN$  と繰返し最大応力拡大係数  $K_{max}$  の関係を示す。なお、応力拡大係数は切欠きから発生したき裂については体積力法<sup>8)</sup>で算出した値を用いている。図 5(a) は過大荷重を負荷していない場合、図 5(b), (c), (d) は、過大荷重を負荷した場合としてない場合を比較したもので、それぞれ  $R$



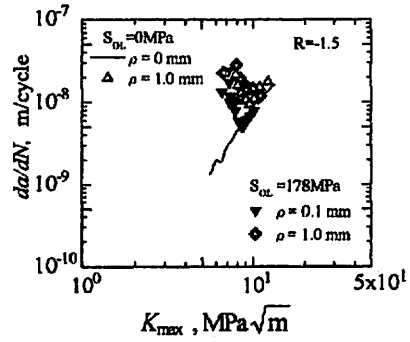
(a) Cases that overload was not applied.



(c) Cases of  $R = -1$ .

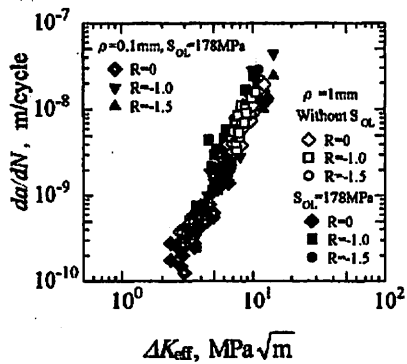


(b) Cases of  $R = 0$ .

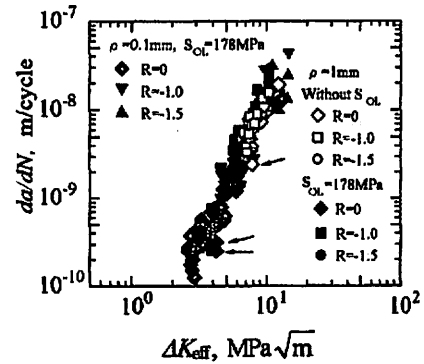


(d) Cases of  $R = -1.5$ .

Fig. 5 Relationships between  $da/dN$  and maximum stress intensity factor.



(a) Cases that stress intensity factors were calculated by the body force method.



(b) Stress intensity factors of all specimens were applied to that of center cracked plate.

Fig. 6 Relationships between  $da/dN$  and effective stress intensity factor range.

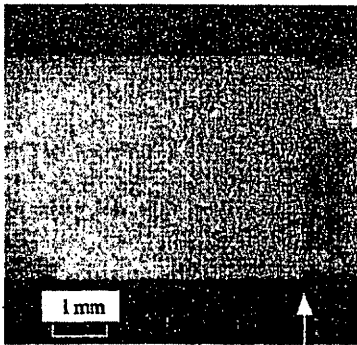


Fig. 7 Observation of fracture surface in the vicinity of the notch bottom  
( $R=-1.5$ ,  $\rho=1$  mm and overload stress = 178 MPa)

が 0, -1, -1.5 の場合である。一般的に知られているように切欠きから発生したき裂が進展する場合は切欠き底付近の応力集中のため、初期にき裂進展速度  $da/dN$  が高く、次第にき裂のみの場合の  $da/dN$  と  $K_{max}$  の関係に漸近していく。本研究の場合においても、そのような傾向がみられる。 $\rho$  が 1mm の結果に着目した場合、 $R$  が 0 と -1 の場合は過大荷重を負荷した場合の方が負荷しない場合よりき裂進展速度  $da/dN$  が低めである。しかし、 $R$  が -1.5 の場合は両者のき裂進展速度の傾向に大差がない。また、き裂進展曲線に現れているように、き裂進展速度  $da/dN$  は  $R$  が 0 の場合が低く、-1.5 の場合が高いという結果になっている。

図 6 にき裂進展速度  $da/dN$  と有効応力拡大係数範囲  $\Delta K_{eff}$  の関係を示す。図 6 (a) は体積法<sup>(8)</sup>によって応力拡大係数を計算した場合、図 6 (b) はき裂が発生した切欠き試験片を全て中央き裂試験片とみなして計算した場合である。中央き裂の場合のデータは図 6 には示していないが、そのデータの分布は図 6 (b) の場合の平均的なものであり、図 6 (b) に示すデータのバラツキの範囲内にある。有効応力拡大係数範囲  $\Delta K_{eff}$  を体積法によって算出した場合も中央き裂の場合の式で近似した場合も、き裂進展速度  $da/dN$  と  $\Delta K_{eff}$  の関係には比較的良好な相関性がある。ただし、中央き裂に対する  $\Delta K_{eff}$  を用いて検討した  $\rho=1$  mm の場合の実験では、矢印で示すように、き裂進展量  $c$  が 0.2mm 以下におけるデータが平均的な関係から若干ではあるが逸脱する傾向を示している。このことは、図 3 (c) からわかるように、 $c$  が 0.2mm 程度以下なら  $F'$  の値が 1 よりも低くなるので、中央き裂試験片として近似した応力拡大係数の

値は厳密に解析した値より高くなること等に関係していると思われる。

図 7 に示す破面の例 ( $R=-1.5$ ,  $\rho=1$  mm の場合) のように、矢印で示した切欠き底付近では破面に多数の段差があり、この場合は、一様に切欠き底に沿って細長いき裂が発生したのではなく、複数の微小き裂が切欠き底に分布して発生し、合体したと考えられる。厳密には、き裂の合体は多少なりともき裂進展挙動に影響を及ぼす。しかし、図 6 の結果から考えると、そのような初期のき裂進展挙動はき裂進展量  $c$  が 0.2mm 以上の範囲における表面でのき裂進展速度には大きな影響を及ぼしていないと思われる。

以上のことから、本報告では、き裂進展量  $c$  が 0.2mm 以上の範囲においては、全ての試験片において、中央切欠き試験片のき裂進展速度  $da/dN$  が中央き裂と仮定して算出した有効応力拡大係数範囲  $\Delta K_{eff}$  を用いることによって、実用上の精度で合理的に整理できると解釈した。そして、 $c$  が 0.2mm 以上の場合には、き裂の発生した切欠き試験片の応力拡大係数がき裂試験片の応力拡大係数によって実用上の精度で近似できることが、上述の理由であると考察した。

等価き裂長さを用いて近似した有効応力拡大係数範囲  $\Delta K_{eff}$  でき裂進展速度を評価することには切欠き形状等に依存した限界がある。図 3 (c) の結果から、本実験で用いた試験片の  $\rho=1$  mm の場合には  $c=0.2$  mm 程度が等価き裂長さとして応力拡大係数の近似計算ができる限界寸法であると考えられる。しかし、き裂進展量  $c$  が 0.2mm 以下の場合には、精密なき裂進展試験をするのは困難であり、本報告では、その限界寸法とき裂進展挙動に関連したことについては図 6 (b) の結果について述べた程度の考察しかできない。また、多数発生した微小き裂が干渉(合体)するので、き裂進展量  $c$  が 0.2mm 以下の初期段階でのき裂の進展は三次元的に解析した方が良いと考えられる。

#### 4. 結 言

平板部を有する試験片の中央に切欠き先端の半径が小さな U 字形切欠きを加工した場合、どの程度のき裂進展によりその試験片が中央き裂試験片とみなせるのかについて検討した。特に、本研究では単一過大荷重を負荷した後の中央切欠き試験片におけるき裂の進展挙動に着目した検討を行った。用いた切欠き半径  $\rho$  は 0.1mm と 1mm である。得られた主な結果は以下



のとおりである。

(1) 過大荷重を負荷した後のき裂進展挙動は切欠きからき裂が発生した場合も中央き裂の場合と同様に応力比  $R$  に依存する。本実験範囲では  $R$  が 0 と -1 の場合には単一過大荷重負荷によって、疲労き裂進展が遅延するが、 $R$  が 1.5 の場合には遅延は生じなかった。

(2) 切欠き長さ  $2r$  が 6mm の場合、切欠きから発生したき裂の長さ  $c$  が 0.2mm 以上であり、切欠き半径  $\rho$  が 1mm 以下であれば、等価き裂長さを用いて算出した場合と体積法で算出した場合の応力拡大係数の誤差は 5% 以内であるので、実用的な精度で中央切欠きを中央き裂とみなして応力拡大係数が算出できる。しかし、特に、 $\rho$  が 1mm の場合、き裂進展量が 0.2mm 以下の範囲では、等価き裂長さを用いて算出した場合は体積法で算出した場合よりも応力拡大係数が高くなり、それらの誤差は 10% 以上になる。

(3) 過大荷重の負荷によるき裂進展の加速や遅延の影響に関わらず、本実験で用いた全ての切欠き試験片で、切欠きから発生したき裂の進展速度  $da/dN$  は、き裂進展量  $c$  が 0.2mm 以上ならば、体積法を用いて算出した有効応力拡大係数範囲  $\Delta K_{eff}$  によって合理的に評価できる。

(4) 本実験で用いた全ての切欠き試験片のき裂進展速度  $da/dN$  は、き裂進展量  $c$  が 0.2mm 以上ならば、中央き裂試験片と近似して算出した有効応力拡大係数範囲  $\Delta K_{eff}$  を用いても実用上の精度で評価できる。そのことは簡便手法として利用できる可能性があると考えられる。

(5) き裂進展初期においては、切欠き底から複数の微小き裂が発生し、それらが干渉 (合体) するので、き裂進展量  $c$  が 0.2mm 以下の範囲でのき裂進展挙動は、三次元的に解析した方が良いと思われる。

最後に、本研究を行うに当たり実験の一部を手伝っていただいた、琉球大学理工学研究科大学院生、久居岳生氏に感謝申し上げます。

## 文 献

- (1) Haddad, M. H. EL., Topper, T. H. and Smith, K. N., Prediction of Non-Propagating Cracks, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 11, No.3 (1979), pp.573 - 584.
- (2) Tanaka, K. and Nakai, Y., Prediction of Fatigue Threshold of Notched Components, *Transaction of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 106, No. 2 (1984), pp.192 - 199.
- (3) Nisitani, H. and Oda, Y., Interference Effect between a Crack and a Notch or Crack in a Semi-Infinite Plate, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 46, No. 407 (1980), pp.745 - 753.
- (4) Makabe, C., Purnowidodo, A. and McEvily, A. J., Effects of Surface Deformation and Crack Closure on Fatigue Crack Propagation after Overloading and Underloading, *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, No.12 (2004), pp.1341 - 1348.
- (5) Miyazaki, T., Purnowidodo, A. and Makabe, C., Effect of Negative Stress Ratio on Fatigue Crack Propagation Behavior after Single Tensile Overload, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 70, No. 700 (2004), pp.1717 - 1724.
- (6) Bao, H. and McEvily, A. J., The Effect of an Overload on the Rate of Fatigue Crack Propagation under Plane Stress Conditions, *Metallurgical and Materials Transactions, Series A*, Vol. 26 (1995), pp.1725 - 1733.
- (7) Kitahara, M., Jono, M., Tanaka, K. and Taketani, M., Measurement of Fatigue Crack Propagation and Crack Closure at Low Stress Intensity Level by Unloading Elastic Compliance Method, *Journal of Society of Materials Science, Japan*, Vol. 125, No. 267 (1976), pp. 899 - 903.
- (8) Nisitani, H., Saito, A. and Noguchi, H., Versatile Method of Two-Dimensional Elastic Problem by Body Force Method (Ist Report, Basic Theory), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 56, No. 530 (1990), pp. 2123 - 2129.
- (9) Tada, H., A Note on the Finite Width Corrections to the Stress Intensity Factor, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 3, No.3 (1971), pp.345 - 347.
- (10) Elber, W., The Significance of Fatigue Crack Closure, *ASTM Special Technical Publications* 486 (1971), p. 230, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.