

多連切欠き材の疲れ挙動について

(第三報 き裂進展に及ぼす切欠きの干渉の影響について)

若原 稔, 末永勝郎*, 規矩 智**

(受理 昭和63年5月31日)

Fatigue Behavior of Steels with Multiple Notches

(Report 3 The Effect of Interaction between Notches on the Fatigue Crack Propagation)

Minoru WAKAHARA, Katsuro SUENAGA* and Satoshi KIKU**

The behavior of fatigue crack propagation of round bar specimens of S35C with one to three sharp notches was investigated and the results obtained are summarized as follows;

- 1) Crack length at notches that did not fracture increased with the overstress ratio and saturated at some ratio.
- 2) The ratio of the crack propagation period in the total fatigue life was estimated to be about 98%, regardless of the number of notches and applied stress.
- 3) The behavior of crack propagation on specimens with two and three notches was found to be explained well with stress intensity factors accounting for interaction between notches by the principle of superposition.

1 緒 言

近接して存在するき裂の種々の分布様式に対する干渉効果の解析については破壊力学による多くの研究⁽¹⁾や資料⁽²⁾がある。しかし、実際に同時に発生した複数のき裂が互に干渉を受けながら伝ばする場合のき裂の進展挙動についての実験結果を解析によって得られた結果と比較検討されたものはほとんど見られない。

従来、筆者は多くの切欠きが連続して存在する多連切欠き材の応力集中係数⁽³⁾、回転曲げ疲れにおける疲れ特性、停留き裂、き裂の発生および伝ばにおよぼす切欠き数⁽³⁾、切欠き半径⁽⁴⁾の影響について調べてきた。そして、多連切欠き材のき裂の停留現象や進展特性などの取扱いにおいては、隣接切欠きの干渉効果による有効切欠き深さの現象より、単に浅い切欠き材として置き換えることができないことを指摘した。

本研究はそのような見地より、多連切欠き材に発生

した複数の隣接するき裂の干渉効果がき裂の進展に及ぼす影響、すなわち多連切欠き材の応力拡大係数について検討を加えたものである。

2 供試材料および試験片

供試材料は市販の直径19mmの機械構造用炭素鋼S35Cを使用した。その化学成分を表1に示す。素材を870℃、30分焼ならしを行ったのち、第一報に示した形状、寸法で切欠き半径 $\rho=0.15\text{mm}$ の単一、二連および三連切欠き試験片に旋削し、旋削による加工ひずみを除去するために窒素ガス雰囲気中で600℃、1時間の焼鈍を行った。その機械的性質を表2に示す。

き裂長さの測定は、所定の応力を繰返した試験片の切欠き部を輪切りにし、さらに直径面で縦割りにしたのものについて対称4点のき裂長さを400倍で測定し、その平均値をもってその繰返し数におけるき裂長さとした。試験機は、小野式回転曲げ疲れ試験機98N・mを使用し、毎分約3,400回転で試験した。

*鹿児島大学名誉教授 **日産自動車株式会社

表1 化学成分

	C	Si	Mn	P	S
	%	%	%	%	%
JIS 規格 S35C	0.32 ~0.38	0.15 ~0.35	0.60 ~0.90	<0.030	<0.035
供試材料	0.34	0.25	0.64	0.022	0.009

表2 機械的性質

	降伏点 σ_s (MPa)	引張強さ σ_b (MPa)	真破断力 σ_T (MPa)	伸び率 δ %	かたさ Hv (20)
JIS 規格 S35C	> 304	> 510	—	23	157 ~207
供試材料	356	571	458	34	172

(600°C60分素雰囲気焼鈍材)

3 実験結果および考察

3-1 疲れ限度および停留き裂

図1に各切欠き試験片のS-N曲線と疲れ限度 σ_{w2} の値を示す。鋭い切欠き材であるから疲れ限度すなわち、き裂強さ σ_{w2} は単一、三連、二連の順に大きくなっており、時間強度についても高繰返し応力では連数による相違は認められないが、応力が低くなると同じ傾向を示している。このことは、三連の場合より二連の方が干渉効果が大きいためにき裂発生繰返し数は二連の方が大きく、その上、後で述べるようにき裂進展速度がより小さいことに起因していると思われる。

図2に σ_{w2} 以下の応力における停留き裂長さとき裂強さ σ_{w2} に対する繰返し応力 σ の比すなわち、過小応力比の関係を示す。き裂の発生する過小応力比は単一、二連、三連の順に大きくなっており、過小応力の値すなわちき裂の発生する限界の応力 σ_{w1} は二連と三連ではほぼ同じ値を示している。

また、停留き裂長さ l_{nrc} (三連切欠きでは外側切欠きについて)についても二連と三連では0.19mmと0.21mmであり、二連の方がわずかに小さいが干渉効果の差はほとんどないものと考えられる。

多連切欠き材では、破断に対する疲れ限度 σ_{w2} 以上の応力ではいずれか一つの外側切欠きで破断し残りの切欠き部にはき裂が残留している⁽⁵⁾。図3に、二連、三連切欠き材の非破断切欠き底における残留き裂長さとき裂強さ σ_{w2} の関係を示す。

二連の場合、過大応力による二つの切欠き部の応力状態は全く同じであるからほとんど同時に二つの切欠

き底にき裂が発生し、その後もほぼ同じ状態でき裂が進展すると考えられる。

三連の場合、過大応力では切欠き半径が鋭いため三つの切欠き底の最大応力とも非常に大きくなり、したがって三つの切欠き底でほとんど同時にき裂が発生する。中央切欠き部のき裂は両外側のき裂の干渉効果によって進展しにくくなるが、両外側のき裂先端附近の応力状態はほぼ同じ状態にあるのでき裂の進展速度も

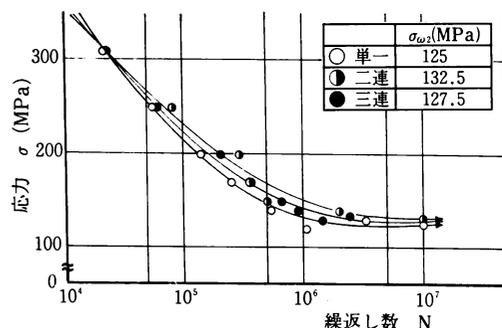


図1 S-N曲線

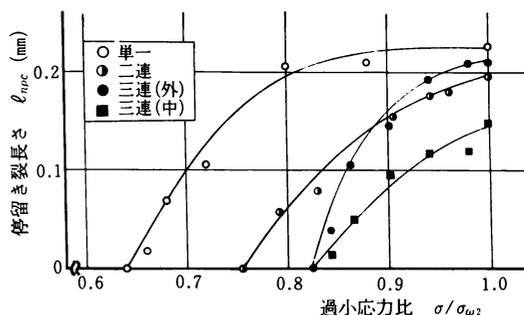


図2 停留き裂

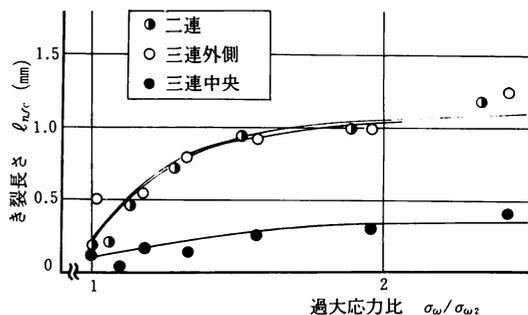


図3 非破断切欠きき裂長さ

ほぼ同じと考えられる。

このようにして、二連切欠きの場合も、中央き裂の進展停留後の三連切欠きの場合も同様に二個のき裂がある長さまで達したとき、どちらか一方のき裂が組織内の障害物に当たると停止し別のき裂が急速に進展して破壊に至るものと考えられる。その段階では、き裂相互の干渉効果よりもき裂長さの増大の結果生じる断面減少による応力増大の効果が大きくなり、ために二連と三連ではほぼ同じ残留き裂長さを示すものと思われる。

3-2 き裂進展挙動について

き裂の進展挙動を調べるために単一、二連、三連切欠き試験片について繰返し応力140, 180MPaそして二連、三連切欠きについては320MPaでも試験を行った。各切欠き材の各応力におけるき裂進展曲線を図4に示す。図より各切欠き試験片とも、一般に鋭い切欠き材に見られる低い応力(140, 180MPa)では一時き裂進展が停滞するが、高応力(320MPa)では進展が順増する傾向を示している。

また、図5は各切欠き試験片のき裂発生繰返し数 N_s を示したものである。図より N_s はどの応力で比較しても単一、三連、二連の順に大きくなっている。すなわち、二連切欠き材の方が三連切欠き材よりも干渉効果が大きくき裂が発生しにくいことを示している。

き裂発生繰返し数 N_s および破断繰返し数 N_f ともに低応力では切欠き数の影響が現われているが高応力ほどその差は小さくなっている。また、低繰返し応力でき裂の進展が停滞するときのき裂長さは、各切欠き数試験片のどの応力でもほぼ一定で0.15~0.20mm程度であり、この長さはき裂強さ σ_{w2} における停留き裂長さと同程度であることからき裂の停留現象と関係を

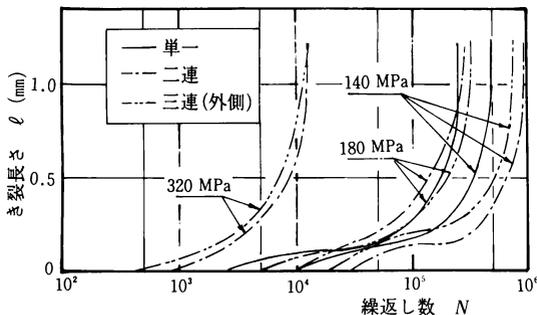


図4 き裂進展曲線

もつものと思われる。

次に、表3に各応力において全疲れ寿命 N_f 中でき裂進展期間 ($N_f - N_s$) が占める割合を示す。

疲れ寿命やき裂発生時期は、切欠き数および繰返し応力によって影響を受けるにもかかわらずき裂進展期間が全寿命に占める割合は切欠き数、繰返し応力には無関係にはほぼ一定で98%を示した。

図6は、三連切欠き材の中央切欠き部のき裂の進展曲線を示したものである。三連切欠きの場合中央のき裂は両外側のき裂の干渉を受けるのでき裂の成長が妨げられてき裂進展速度は小さくなりき裂長さも小さくなる。

表3 き裂進展期間

切欠き数	応力 [MPa]	全寿命に占める割合 [%]
1	140	98.4
	180	98.7
2	140	98.5
	180	97.1
	320	95.8
3	140	98.2
	180	98.1
	320	97.9

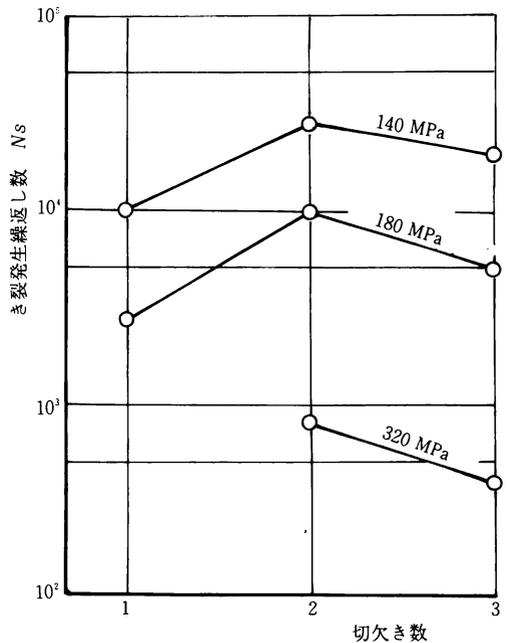


図5 き裂発生繰返し数

中央切欠き部のき裂長さ b の両側切欠き部のき裂長さ a に対する比の繰返し数による変化を応力140MPaの場合について図7に示す。各応力ともき裂の進展中を通じて比 b/a はほぼ0.5であるが、き裂の進展が増大し始める時期より次第に減少してゆく傾向がある。

この傾向が現われ始める以後の期間は中央き裂による干渉は無視され、間隔が2倍(ピッチの2倍)の二個の等長き裂が相互に干渉しながら進展するものと考えられる。また、中央き裂にも外側き裂と同様にき裂進展の停滞現象を生じておりこれは両側き裂が停滞している間はそれらき裂の干渉による応力場にも変化が起こらないためである。

図8にき裂進展曲線より得られた各応力における単一、二連、三連切欠き材のき裂進展速度曲線を、図9に三連切欠き材の中央切欠き部のき裂進展速度曲線を示す。

図8に示されるように各切欠き材、各応力について進展速度曲線には極小値が存在し、その極小値を生ずるき裂長さは各切欠き材とも応力が大きくなるほど、ま

た同一応力では単一、三連、二連の順に大きくなっている。鋭い切欠き材において切欠き底に発生したき裂の進展挙動を進展速度について考えると、き裂発生から進展速度が減少して極小値に至るまでの第Ⅰ期と、その後進展速度が増大して破断に至るまでの第Ⅱ期に分けられ、疲れ限度(ここではき裂強さ) σ_{w2} 以下の応力では第Ⅰ期のみが現われ、一方鈍い切欠き材ではき裂発生初期からき裂進展速度が増大して破断に至るので第Ⅱ期のみが現われる。この極小値、すなわちき裂進展速度曲線の変曲点は、図4に示したき裂進展曲線の停滞域に存在しており、極小値に達するまでの進展速度減少期間、すなわち第Ⅰ期ではき裂長さが短かいためき裂長さに比して塑性域寸法が大きい、極小値以後の第Ⅱ期では塑性域寸法がき裂長さに比して十分小さいいわゆる小規模降伏状態の領域が存在し、応力拡大係数によって整理することが可能と思われる。

図9に示されるように三連切欠き中央切欠き部のき裂は、隣接する両外側のき裂の干渉を受けるので外側き裂と同様の傾向を示すが、外側き裂と比較してき裂進展速度は小さくまた極小値を生ずるき裂長さも小さくなっている。

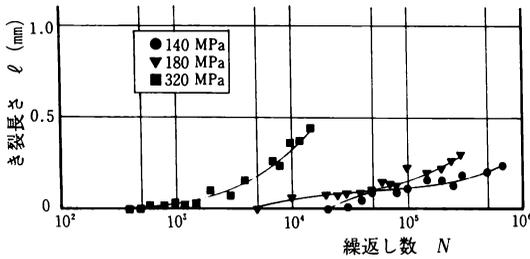


図6 三連・中央切欠き部き裂進展曲線

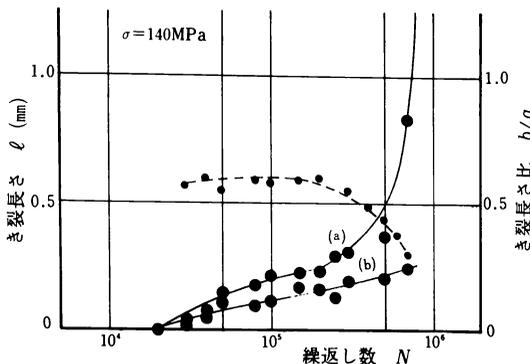


図7 三連切欠き材き裂進展曲線

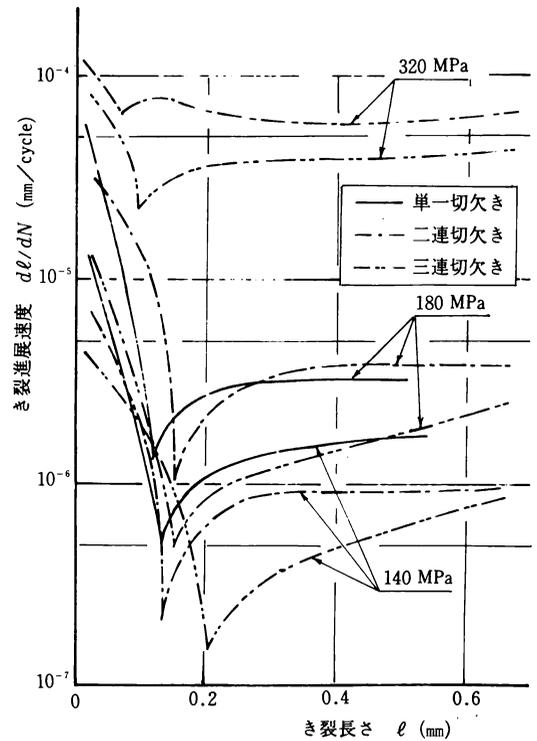


図8 き裂進展速度曲線

3-3 干渉を考慮した応力拡大係数の算定

従来、環状切欠き材の回転曲げに関しては、小林、中沢によって導かれた応力拡大係数⁽⁸⁾

$$K = \sqrt{\frac{\pi r \ell}{0.8r + 7.1\ell}} \cdot \sigma_{net} \quad (1)$$

ここで、
 r : き裂底半径
 ℓ : き裂深さ
 σ_{net} : き裂底での公称応力

を用い、また板状切欠き材の面内曲げに関しては、Bentham⁽²⁾による応力拡大係数を適応してきたが、第II報で指摘したようにこれらの式は単一の切欠き材に対するものであって、本研究におけるように切欠き材が複数で相互干渉の効果が含まれる場合には適さないと思われる。従って干渉を考慮した応力拡大係数が要求される。複数き裂の相互干渉についての解析結果は種々求められているが⁽⁹⁾、本研究におけるような縁に直交する複数の環状き裂の干渉について直接適用可能な解析結果は報告されていない。そこで、ここでは石田の半無限板におけるき裂群の応力拡大係数に関する資料⁽¹⁰⁾を適応して近似的に求めてみた。

石田の示したモードI（開口変形）に対する縁に直交する2個のき裂および等長で等間隔に配列する縁き裂（き裂数 $N=3$ ）についての無次元パラメータ F と長い方のき裂長さ a に対するき裂間隔 d の比 d/a との関係を図10および図11に示す。

応力拡大係数は一般に次の形で表現される。

$$K = F \sqrt{\pi a} \sigma \quad (2)$$

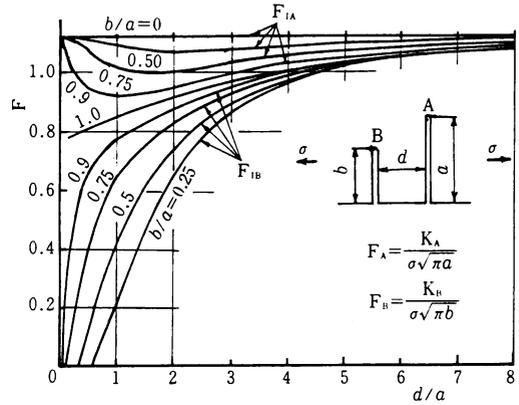


図10 縁に直交する2個のき裂¹⁰⁾

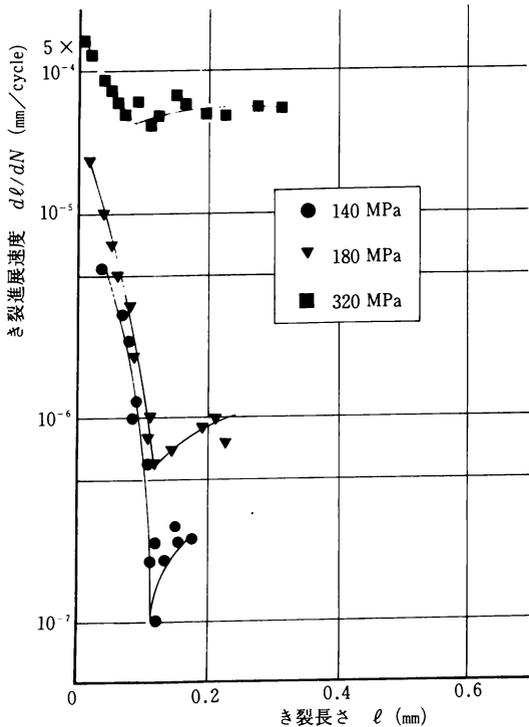


図9 き裂進展速度曲線（三連・中央）

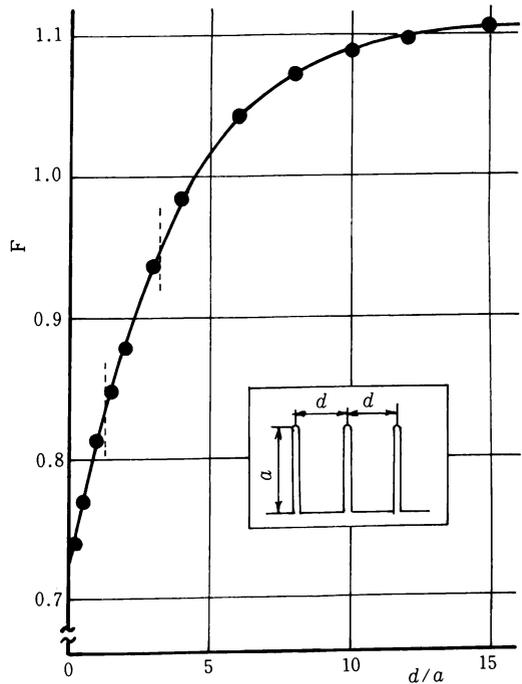


図11 等長で等間隔に配列する縁き裂 ($N=3$)¹⁰⁾

ここで a : き裂の長さ

無次元係数 F は絶対寸法を含むことなく相似形の特性をあらわすパラメータ, すなわち部材形状や荷重作用位置を表わす寸法比をパラメータとして表現できるので図10および図11を利用して F を求め(2)式より応力拡大係数を算出した。なお, この資料では体積方法⁽¹¹⁾を用いており, この方法によると精度が極めて高く, 少ない元数の連立方程式を解くことによって十分正確な結果を与えるというメリットをもつ。

図10において, き裂長さ a (長いき裂) および b (短いき裂) は有効切欠き深さ t_e ⁽¹²⁾ と切欠き底よりのき裂長さ l との和, すなわち

$$a \text{ (または } b) = t_e + l \quad (3)$$

とし, 有効切欠き深さは光弾性実験による測定結果⁽⁴⁾より Nishioka ら⁽¹²⁾が示した $t_e = 0.32p$ (p : 切欠き間隔)を用いた。

また, 切欠き底よりのき裂長さの上限をき裂進展曲線より判断して1.50mmにとると有効き裂長さ a とき裂間隔 d (ここでは $p = 3.58\text{mm}$) との比 d/a は, 表4で示され, この範囲内に限って解析を行なうこととした。

i) 二連切欠き材について

二連切欠きの場合のき裂進展の様相を進展データより推測すると, 各切欠きに発生する二個のき裂は同じ応力環境のもとで発生, 進展するものと考えられる。そして破断に至る直前に二個のき裂の進展速度にわずかに差が生じ, どちらか一方のき裂の先端に応力が集中して急激に進展し破断に至ると考えられる。しかし, この領域ではすでに小規模降伏状態の領域を越えているので除外する。よって二連切欠きに関しては両き裂が平行・等長で成長すると仮定して図10中の $b/a = 1$

表4 d/a の範囲

l (mm)	0.00~1.50
a (mm)	1.15~2.65
d/a	1.30~3.20

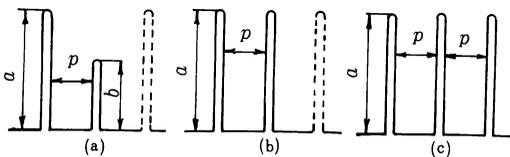


図12 干渉を考慮したき裂の形態

の曲線を用い, また表4の d/a の範囲内で二分割して直線近似し F に関して次のような近似式を得た。

$$1.30 \leq d/a < 2.30 \text{ のとき}$$

$$F_{21} = 0.052(d/a) + 0.805 \quad (4-1)$$

$$2.30 \leq d/a < 3.20 \text{ のとき}$$

$$F_{21} = 0.043(d/a) + 0.825 \quad (4-2)$$

よって, 二連切欠き材に対する応力拡大係数 K_{21} は(2)式より $K_{21} = F_{21} \sqrt{\pi a} \cdot \sigma_{net}$ により算出する。

ii) 三連切欠き材について

三連切欠き材に発生するき裂は, 外側の二個の切欠きは全く同じ応力状態にあるが, 中央の切欠きは両側の切欠きの干渉により応力が軽減されるので両側切欠きのき裂は等長で長く, 中央切欠きのき裂はそれより短くなると考えられる。そこで図10, 図11を次のような組合せによって近似的に取扱った。すなわち, 三連切欠きに対する応力拡大係数 K_{31} は次式で表わす。

$$K_{31} = K_{31A} - (K_{31B} - K_{31C}) \quad (5)$$

ここで,

K_{31A} : 短い中央き裂 b の干渉を考慮した外側き裂 a に関する応力拡大係数 (図12(a))

K_{31B} : 二個の等長き裂 a が間隔 d で平行に存在する場合の応力拡大係数 (図12(b))

K_{31C} : 三個の平行等長き裂 a が等間隔 d で存在する場合の外側き裂の応力拡大係数 (図12(c))

上式の左辺第2項の () 内は, 反対側の外側き裂の干渉の影響を示すので, この値を K_{31A} より減ずれば三連切欠きのき裂に対する応力拡大係数が得られる。

よって無次元パラメータ F についても $F_{31} = F_{31A} - (F_{31B} - F_{31C})$ として図10, 図11より近似的に求めた。

まず F_{31A} については, き裂長さ $a = 1.00\text{mm}$ を b/a について三分割して求めた結果次のような近似式を得た。

$$0 \leq b/a < 0.45$$

$$F_{31A} = -0.144(b/a)^2 + 1.121 \quad (6-1)$$

$$0.45 \leq b/a < 0.75$$

$$F_{31A} = |0.033(d/a) - 0.364|(b/a) - 8.085 \times 10^{-3}(d/a) + 1.230 \quad (6-2)$$

$$0.75 \leq b/a < 1.00$$

$$F_{31A} = |0.183(d/a) - 0.772|(b/a) - 0.131(d/a) + 1.582 \quad (6-3)$$

次に F_{31B} は二連切欠きに対して求めた(4)式を用いた。

また F_{31C} についても図11の直線近似により

$$F_{3ic} = 0.059(d/a) + 0.760 \quad (7)$$

を得た。これらの式の誤差は0.2~1.0%の範囲内におさまった。

3-4 干渉を考慮した応力拡大係数によるき裂進展挙動の評価

き裂が複数並んで存在する二連および三連切欠き試験片について(4)~(7)式を用いて求めた干渉を考慮した応力拡大係数によりそれらのき裂の進展挙動の評価を試みた。図13に単一、二連切欠き材に対する応力拡大係数 $K_i (i=1, 2)$ とき裂進展速度 $d\ell/dN$ の関係を示す。その結果得られた関係式を単一、二連、三連について表5に示す。Parisの式 $d\ell/dN = CK^m$ における m の値は、材料、 K および応力状態に依存して2~7の範囲内にあると報告⁽¹³⁾されているが、本実験結果もその範囲内にある。また、相関係数 r については、干渉を考慮した場合については表5に示すように切欠き数のいかにかわらず1.000に近く高い相関性を示している。一方、干渉を考慮しない場合、すなわち1個の切欠きに対する K の式のデータ(図13に二連切欠きの場合を示す。)の相関係数は、二連切欠き0.908、三連切欠き0.863となり相関性が劣っている。すなわち、干渉を受ける二連、三連切欠きについ

ては(1)式を用いることは不適当と云える。また、二連切欠きと三連切欠きを比較すると三連切欠きの方が低下の度合いが著しく、干渉に対してより敏感であることを示している。図14に単一、二連、三連切欠きに対する応力拡大係数とき裂進展速度の関係を示す。図よりき裂の進展挙動は次の一つの式によって記述され、重ね合せの原理を応用した応力拡大係数によってよく整理されることがわかる。

$$d\ell/dN = 9.269 \times 10^{-14} \cdot K^{6.627} \quad (8)$$

また、干渉の影響がき裂の進展に伴ってどのように変化するかを明らかにする目的で二連、三連切欠き材に対する干渉効果係数 I_2, I_3 について検討を試みた。

$$I_2 = \frac{K_1 - K_2}{K_1}, \quad I_3 = \frac{K_1 - K_3}{K_1} \quad (9)$$

ここで、

K_{1i} : 干渉を考慮しない応力拡大係数

K_{2i}, K_{3i} : 干渉を考慮した応力拡大係数

表5 K-dℓ/dN 関係式

切欠き数	関係式	相関係数 r
1	$d\ell/dN = 2.898 \times 10^{-11} \cdot K_{11}^{4.249}$	0.978
2	$d\ell/dN = 7.778 \times 10^{-14} \cdot K_{12}^{6.808}$	0.992
3	$d\ell/dN = 1.119 \times 10^{-13} \cdot K_{13}^{6.488}$	0.981

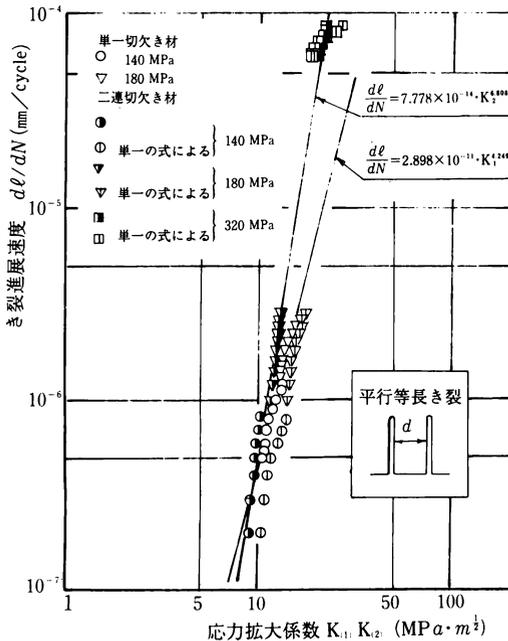


図13 応力拡大係数とき裂進展速度の関係

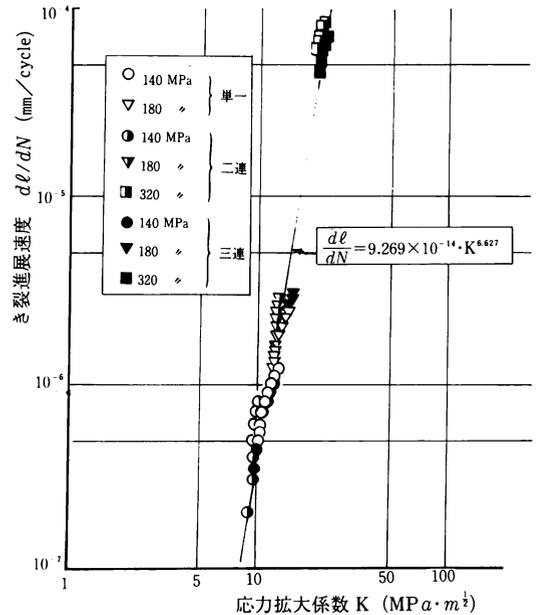


図14 干渉を考慮した応力拡大係数とき裂進展速度の関係

き裂長さの変化に伴う干渉効果係数の変化を図15に示す。図より二連、三連切欠きとも一つの曲線で示され、き裂長さに対する干渉効果は干渉の相違による影響を受けずに変化することを表わしている。また、320MPaの過大応力下ではき裂の進展速度が大きき、140MPaおよび180MPaと比較してほぼ等速的にき裂が進行するため並列して存在するき裂の干渉による応力場の減少の影響よりも、過大応力による応力場の拡大が単一のき裂と考えた場合よりも大きくなる影響のため負の値が現われたものと思われる。

次に、き裂進展速度と干渉効果係数の関係を図16に示す。図より負荷応力の大小、切欠き数のいかんにかかわらず干渉効果係数 I は進展速度の増大に伴って増加する。このことは、き裂進展速度が増大すれば応力場も増大し、干渉の効果も当然大きくなることから理解される。また、干渉の効果は二連切欠きより三連切

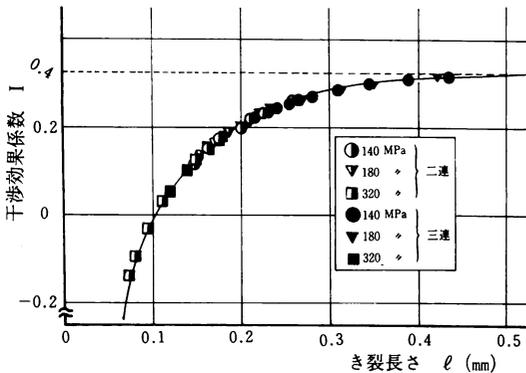


図15 き裂長さ と干渉効果

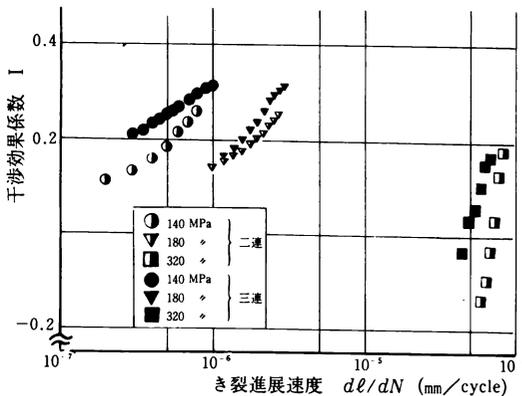


図16 き裂進展速度 と干渉効果

欠きの方が大きいので、同じ干渉効果係数を与えるき裂進展速度は二連切欠きの方が大きくなる。

4 結論

以上、鋭い切欠きを持つ単一、二連、三連切欠き試験片について回転曲げ疲れ試験を行ない、き裂進展特性を調べ、干渉を考慮した応力拡大係数によるき裂進展挙動の評価を試みた結果、次のような結論を得た。

- 1) 時間強度は単一、三連、二連切欠きの順に大きくなる。
- 2) 二連切欠きおよび三連切欠きにおける非破壊部のき裂長さは、過大応力比の増加に伴って増すが、ある応力比で飽和する。
- 3) 単一切欠きから三連切欠きの範囲内では、き裂進展期間が全寿命に占める割合は、切欠き数、繰返し応力の大小にかかわらずほぼ98%である。
- 4) き裂進展速度曲線にあらわれる進展速度の極小値は単一、三連、二連切欠きの順に大きくなる。
- 5) 二連切欠きおよび三連切欠きに対して重ね合せの原理により干渉を考慮した応力拡大係数でき裂進展挙動の評価を試みた結果、応力拡大係数によってよく整理される。
- 6) き裂相互間の干渉効果は、き裂長さおよびき裂進展速度の増大に伴って大きくなり、き裂長さ、繰返し応力の大小の影響は認められない。

文献

- 1) 例えば、石田、機論、35-277 (昭44-9), 1815.
- 2) H.Tada. The Stress Analysis of Crack Handbook, (1973), Del Research Corporation.
- 3) 若原ほか、機講論、748-2 (昭49-5), 17. 若原ほか、鹿児島大学工学部研究報告、18 (昭51), 37.
- 4) 若原ほか、機講論、798-2 (昭54-5), 22.
- 5) 若原ほか、日本材料学会第29回総会講演論文集 (昭55-5), 185.
- 6) 大平ほか、機論、42-360 (昭51-8), 2281.
- 7) 新井ほか、機論、49-437A (昭58-1), 29.
- 8) 小林ほか、機論、36-288 (昭45-8), 1238.
- 9) 例えば、石田、機誌、75-642 (昭47-7), 1126.
- 10) 石田、機論、45-392, (昭54-4), 306.
- 11) 西谷、機誌、70-580, (昭42-5), 627.
- 12) N.Nishioka, J.App.Mech., 29-3 (1962), 575.
- 13) 小林ほか、材料、18-190 (昭44-7), 49.