

多連切欠き材の疲れ挙動について

(第二報 切欠きの干渉が平面曲げ疲れ特性に及ぼす影響について)

若原 稔, 皮籠石紀雄, 末永 勝郎*
(受理 昭和63年5月31日)

Fatigue Behavior of Steels with Multiple Notches

(Report 2 The Effect of Interaction between Notches on the Characteristics of Plane Bending Fatigue)

Minoru WAKAHARA, Norio KAWAGOISHI and Katsuro SUENAGA*

Fatigue crack initiation and propagation in flat bar specimens with multiple notches of carbon steels for machine structural uses, S35C, were examined in plane bending. The results obtained are summarized as follows;

- 1) The effects of the interaction of closely spaced notches were found on crack initiation and propagation, and the effect of an even numbers of notches was found larger than that of odd ones.
- 2) The ratio of crack propagation period to fatigue life increased with the number of notches.
- 3) In general, the number of cycles at crack initiation depended on the stress intensity factor.
- 4) The crack length at the inflection point in the fatigue crack growth rate curve became shorter with the number of notches.

1 緒 言

従来、疲れに関する多くの研究は、1個の切欠きを持つ試験片についてなされてきており、破壊力学の適応により急速な進歩をとげた。また、切欠きやき裂の干渉効果に関しての応力拡大係数の解析も多く行なわれている⁽¹⁾。一方、切欠き部が連続して存在する歯車⁽²⁾、あるいは隣接き裂材⁽³⁾の疲れ破壊に関する研究がなされているが、干渉効果について解析的に得られた結果との比較検討はほとんどなされていない。

筆者らは、隣接するき裂の干渉について実験の結果と解析の結果を比較し、その適合性を検討するための第一段階として先に回転曲げ疲れに関して切欠き数が疲れ特性に及ぼす影響について報告⁽⁴⁾⁽⁵⁾したが、本報告ではき裂の連続的測定が比較的容易である面内曲げ

疲れ試験によりき裂進展に及ぼす干渉効果について検討を試みた。

2 試験片および実験方法

供試材料は、市販の機械構造用炭素鋼 S35C 圧延平鋼 (厚さ29mm, 巾65mm) 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図1, 表2に示す形状, 寸法の単一より四連までの切欠き試験片 (図1には三連切欠きまで示してある。) に切削し、その後加工による残留ひずみを除去する目的で窒素ガス雰囲気中で600℃, 1時間の焼なましを

表1 化学成分 (%)

	C	Si	Mn	P	S
JIS S 35C	0.32~0.38	0.15~0.35	0.60~0.90	<0.030	<0.035
供試材	0.39	0.28	0.41	0.016	0.011

* 鹿児島大学名誉教授

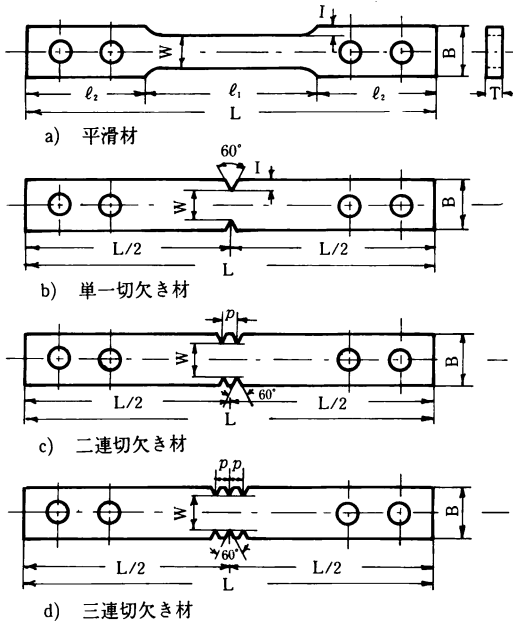


図1 疲労試験片

表2 疲労試験片寸法

								(mm)
L	l ₁	l ₂	B	T	W	H	p	ρ
120	35	50	15	5	10	2.5	3.58	0.15
								0.30
								0.60

行った。その機械的性質を表3に示す。

焼なましののち、き裂測定を容易にするために試験片表面を紙やすりで0/6番まで磨きバフ仕上げを行った。き裂長さは、それぞれの応力の任意の繰返し数で試験機を止めて測定した。

試験機は、島津曲げ・ねじり疲れ試験機TB-10形10kgf・mを使用し、毎分繰返し数2,000回で試験した。

表3 機械的性質

	降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	真破断力 kg/mm ²	伸び %	絞り %	かたさ Hv(20)
JIS S35C	>31	>52	76~112	>23	—	157~207
焼鈍材	41.9	65.7	104.4	27.6	44.3	168

窒素雰囲気中600℃, 60分保持後炉冷

3 実験結果および考察

3-1 疲れ限度

単一より三連までの試験片のそれぞれの切欠き半径に対するS-N曲線を図2に、また応力繰返し数10⁷ cycleでの疲れ限度σ_{w1}, σ_{w2}および応力集中係数を表4に示す。なお、表中の応力集中係数は光弾性実験より求めた値である。

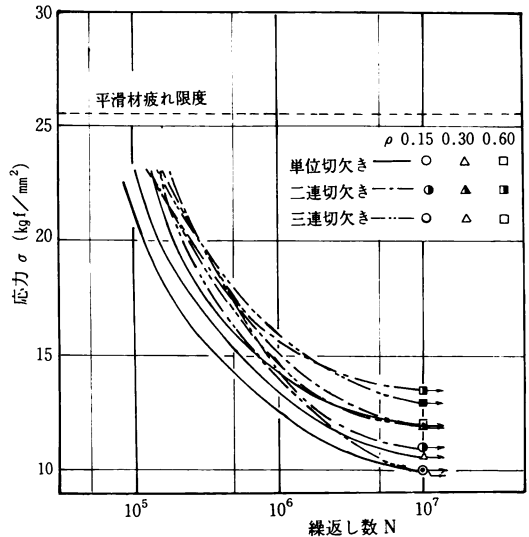


図2 S-N曲線

一般に切欠き数が増加すると、隣接する切欠き間の干渉により応力集中係数は減少し、それに伴って疲れ限度は上昇するが、本実験結果も同様の傾向を示している。しかしながら表4に見られるように切欠き数が増加することによる応力集中係数の減少と疲れ限度の上昇へ対する影響のしかたが異っている。すなわち、切欠き数が単一、二連、三連そして四連と増加するにつれて応力集中係数は単調に減少しているのに対して、疲れ限度は奇数切欠きと偶数切欠きでは変動し、四連、二連、三連、単一の順に小さくなり偶数切欠きが奇数切欠きより高い値を示している。このことは、先に報告した多連切欠き材の回転曲げ疲れ限度の場合⁽⁵⁾と同様の結果であり、切欠き数が増加することすなわち追加切欠きによる応力集中軽減の効果をそのまま単純に疲れ限度に適応することはできないことを示している。

表4 疲れ限度と応力集中係数

	切欠き半径	応力集中係数	疲れ限度	σ_w kgf/mm ²
	ρ mm		α	疲れ強さ σ_{w1}
平滑材	—	1.00	25.50	—
	0.15			4.20
単一切欠き材	0.30	3.41	9.50	10.50
	0.60	2.57	12.00	—
	0.15	3.61	11.00	—
二連切欠き材	0.30	3.09	12.00	—
	0.60	2.40	13.50	—
	0.15	3.34	9.50	10.00
三連切欠き材	0.30	2.89	12.00	—
	0.60	2.28	13.00	—
	0.15	3.14	13.00	13.50
四連切欠き材	0.30	2.74	14.50	—
	0.60	2.18	15.50	—

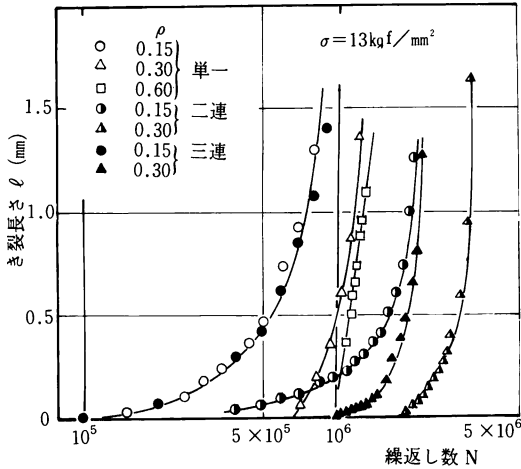


図3 き裂進展曲線

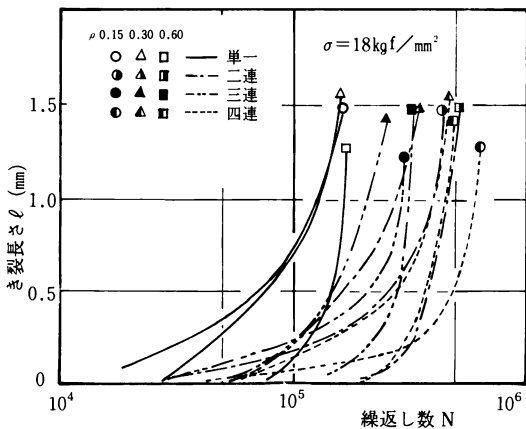


図4 き裂進展曲線

3-2 疲れき裂の進展

図3, 図4に繰返し応力 $\sigma = 13 \text{ kgf/mm}^2$ (四連では疲れ限度以下のため除く), 18 kgf/mm^2 における各切欠き数, 切欠き半径試験片に対するき裂進展曲線を示す。ここで複数切欠きに対するき裂長さは, 対称切欠きでは多少のばらつきがあるがほぼ同じように進展しているの両者の平均値で示してある。

き裂発生の応力繰返し数は, 単一切欠き試験片の場合は切欠き底の最大応力 $\sigma_{max} = \alpha\sigma$ によって支配されるが⁽⁷⁾, 図より本実験における多連切欠き試験片の場合も奇数切欠きと偶数切欠きでそれぞれに σ_{max} の値に依存しており偶数切欠きの方が奇数切欠きよりも大きい。すなわち, すべての切欠き半径で単一, 三連, 二連, 四連の順にき裂発生の応力繰返し数が大きくなり, したがってき裂発生に対する追加切欠きによる干渉は偶数切欠きの方が大きいことを示している。

つぎに, き裂の発生と破断寿命間の関係に切欠き数が及ぼす影響について考察してみる。

表5は, 各切欠き数, 切欠き半径試験片のそれぞれの応力におけるき裂進展曲線より外挿して得られたき裂発生繰返し数 N_{sn} , 破断寿命 N_{fn} と両繰返し数の比 N_{sn}/N_{fn} および多連切欠き試験片における N_{sn} , N_{fn} の単一切欠き試験片における発生繰返し数 N_{s1} , 破断寿命 N_{f1} に対する比を示してある。また図5は, 負荷された最大応力 $\sigma_{max} = \alpha\sigma$ と繰返し数比 N_{sn}/N_{fn} の関係を整理したものである。

図5より, σ_{max} と N_{sn}/N_{fn} は ρ に関係なく各切欠

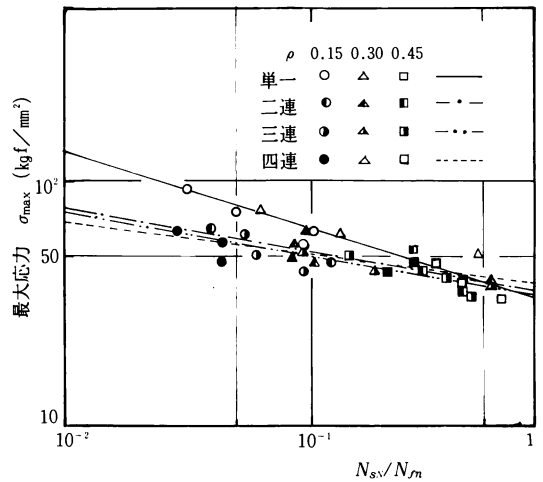


図5 $\sigma_{max} - N_{sn}/N_{fn}$

表 5 き裂発生繰返し数と破断寿命

		単一切欠き材					二連切欠き材				
ρ mm	σ kgf/mm ²	σ_{max} kgf/mm ²	N_{S1}	N_{f1}	N_{S1}/N_{f1}	σ max kgf/mm ²	N_{S2}	N_{f2}	N_{S2}/N_{f2}	N_{S2}/N_{S1}	N_{f2}/N_{f1}
0.15	22	92.4	3.2×10^3	9.93×10^4	0.032						
	18	75.6	1.0×10^4	1.98×10^5	0.051	65.0	2.0×10^4	4.94×10^5	0.040	2.00	2.49
	15	63.0	3.5×10^4	3.34×10^5	0.102	54.2	8.0×10^4	8.41×10^5	0.095	2.29	2.44
	13	54.6	9.0×10^4	9.70×10^5	0.093	46.9	2.5×10^5	2.06×10^6	0.121	2.78	2.12
0.30	18	75.0	1.2×10^4	1.89×10^5	0.063	55.6	4.0×10^4	4.69×10^5	0.086	3.33	2.47
	15	61.4	8.0×10^4	6.05×10^5	0.132	46.4	9.0×10^4	8.85×10^5	0.102	1.13	1.46
	13	51.2	6.5×10^5	1.36×10^6	0.478	40.2	1.8×10^6	3.38×10^6	0.533	2.77	2.49
0.60	22					52.8	4.5×10^4	1.72×10^5	0.262		
	18	46.3	7.5×10^4	2.33×10^5	0.322	43.2	1.7×10^5	5.90×10^5	0.288	2.27	2.53
	15	38.6	2.4×10^5	5.88×10^5	0.408	36.0	7.5×10^5	1.81×10^6	0.414	3.13	3.08
	13	33.4	8.0×10^5	1.35×10^6	0.592						

		三連切欠き材					四連切欠き材							
ρ mm	σ kgf/mm ²	σ_{max} kgf/mm ²	N_{S3}	N_{f3}	N_{S3}/N_{f3}	N_{S3}/N_{S1}	N_{f3}/N_{f1}	σ kgf/mm ²	σ_{max} kgf/mm ²	N_{S4}	N_{f4}	N_{S4}/N_{f4}	N_{S4}/N_{S1}	N_{f4}/N_{f1}
0.15	22							20	62.80	1.0×10^4	3.44×10^5	0.029		
	18	60.1	2.0×10^4	3.11×10^5	0.064	2.00	1.57	18	56.52	2.8×10^4	6.43×10^5	0.044	2.80	3.25
	15	50.1	4.5×10^4	6.47×10^5	0.070	1.29	1.88	15	47.10	9.0×10^4	2.10×10^6	0.043	2.57	6.29
	13	43.4	1.0×10^5	1.07×10^6	0.093	1.11	1.10							
0.30	18	52.0	3.0×10^4	3.35×10^5	0.092	2.50	1.72	22	60.28	1.9×10^4	1.98×10^5	0.096		
	15	43.4	1.3×10^5	7.09×10^5	0.183	1.63	1.17	20	54.80	2.4×10^4	2.65×10^5	0.091		
	13	37.6	1.2×10^6	2.30×10^6	0.522	1.85	1.69	18	49.32	4.6×10^4	5.49×10^5	0.084	3.83	2.90
0.60	22	50.2	2.0×10^4	1.41×10^5	0.142			22	47.96	3.8×10^4	1.45×10^5	0.264		
	18	41.0	1.2×10^5	3.40×10^5	0.353	1.60	1.46	20	43.60	5.8×10^4	2.81×10^5	0.206		
	15	34.2	6.5×10^5	1.46×10^6	0.445	2.71	2.48	18	39.24	2.1×10^5	5.22×10^5	0.402	2.80	2.24

き数ごとにはほぼ一本の直線で表わされる。

表 5, 図 5 より次のことが云える。

1) N_s/N_f は切欠き底最大応力 σ_{max} に大きく依存しており, σ が小さくなるほど N_s/N_f の値は大きくなり, その傾向は切欠き半径 ρ が大きくなるほど顕著である。

2) 図 5 に示されるように切欠き数により直線の傾きが異なり, 切欠き数が多くなると傾斜がゆるやかになるが, 回転曲げ疲れ試験の結果得られたように⁽⁴⁾⁽⁵⁾, 偶数, 奇数切欠きによる違いはあるとしても追加切欠きによる干渉効果は徐々に飽和することによって, この場合もある一定値に近づくものと思われる。

3) 一般に σ_{max} が小さいほど破断寿命 N_f は大きくなり, しかもき裂発生までの繰返し数 N_s が破断寿命に占める割合も増加する。しかし, 表 5 より N_s, N_f は同じ切欠き半径, 同じ応力の下ではともに単一 > 三連 > 二連 > 四連の順となり, 最大応力で示される単一 > 二連 > 三連 > 四連の順と異なり, 二連, 四連すなわち偶数切欠きではき裂が発生しにくく, また寿命

も延びている。これを同一応力で比較すると, N_s, N_f ともにすべての切欠き半径で平均して単一に比べて二連は約 2.4 倍, 三連は約 1.6 倍, 四連では約 3 倍に増加しており, き裂の発生, き裂の進展期間つまり寿命ともほぼ同じ増加率を示していることになる。このことより, 追加切欠き効果はき裂の発生, 進展のいずれにもほぼ同じ割合で現われて, それは奇数切欠きよりも偶数切欠きの方が大きいといえる。また, 進展期間が増加することは平均き裂進展速度が減少することを意味するが, あとで示す図 8 のき裂進展速度線図に示されるように進展初期における速度の大きな減少が影響しているものと思われる。

4) 単一切欠きに比べて二連切欠きではき裂発生までの繰返し数 N_s , 破断寿命 N_f とも増加するが N_s の増加量が少ない。すなわち, 同一 σ_{max} で比較すると二連の方が N_s/N_f が小さいことよりき裂の発生するまでの期間 N_s よりもき裂の進展期間 N_p の寿命を占める割合が大きいと云える。

単一切欠きでは, き裂の発生は主として σ_{max} によ

って支配されるので、その値が同じであれば N_s はほぼ同じであるが、その後の進展は繰返し応力 σ によって支配され σ が大きいほど進展速度は大きくなる⁶⁾。このことはき裂進展期間 N_p が小さくなることを意味しているが、多連切欠きの場合単一切欠きと比較して同一 σ_{max} の場合は応力集中係数 α が小さく従って σ が大きくなるにもかかわらず進展期間 N_p が大きくなっている。その理由として、き裂進展を増大させる応力の効果よりも多連切欠きにおけるき裂の干渉効果の方がき裂進展を減少させる要因として大きく影響しそのため N_p が大きくなったと考えられる。

つぎに、繰返し応力 σ とき裂発生繰返し数 N_s の関係を $\rho=0.15\text{mm}$ と 0.60mm の試験片について整理すると図6に示されるようにはほぼ直線関係にある。

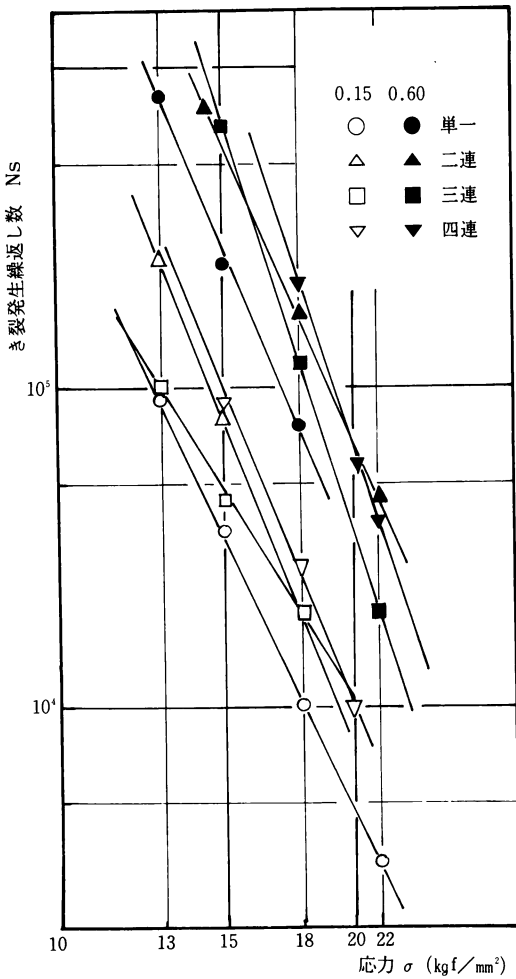


図6 応力とき裂発生繰返し数の関係

き裂発生までの繰返し数 N_s が切欠き深さをき裂長さとして置き換えたときの応力拡大係数でよく整理できることより、多連切欠き材の切欠きにより干渉を無視して次に示す単一切欠き材の面内曲げに対する Benthem による応力拡大係数の式⁷⁾を適用した K と N_s の関係を単一、二連、三連切欠きについて示したのが図7である。

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F_1$$

ここで

$$F_1 = \left(1 - \frac{a}{b}\right)^{-\frac{3}{2}} \cdot G$$

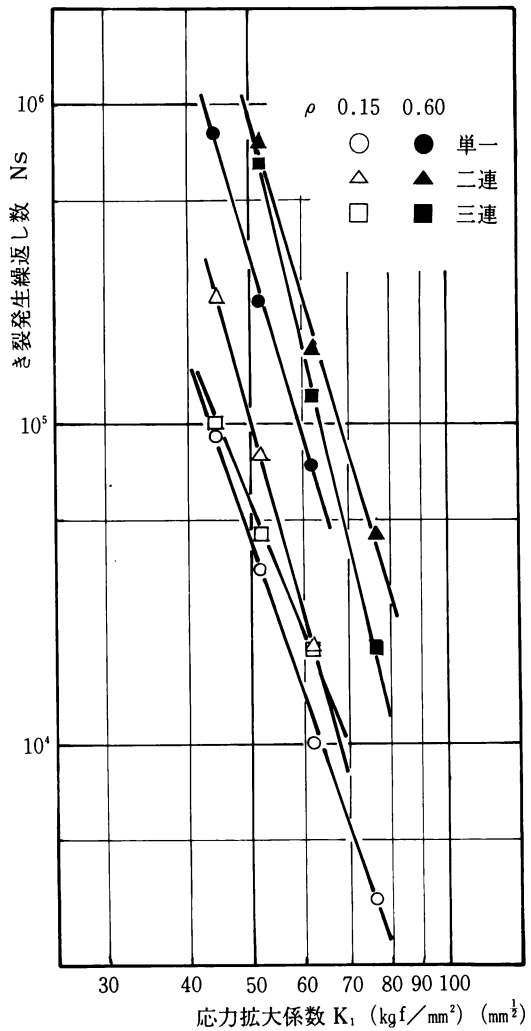


図7 応力拡大係数とき裂発生繰返し数の関係

$$G = \frac{4}{3\pi} \left[1 + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{a}{b} \right) + \frac{3}{8} \left(1 - \frac{a}{b} \right)^2 + \frac{5}{16} \left(1 - \frac{a}{b} \right)^3 \right] - 0.470 \left(1 - \frac{a}{b} \right)^4 + 0.663 \left(1 - \frac{a}{b} \right)^5$$

ただし

- a: き裂長さ
- b: 板の巾

図7より応力拡大係数 K とき裂発生繰返し数 N_s の関係も σ と N_s の場合と同様に各切欠き数, 切欠き半径ごとにほぼ直線関係にあり, 多連切欠き材におけるように干渉のもとでのき裂の進展挙動も, 干渉効果についての補正をほどこすことによって単一切欠き材と同様に応力拡大係数によって整理されるものと思われる。

3-3 疲れき裂進展速度

単一の切欠き材の疲れき裂の進展においては, 切欠きが鈍い場合はその進展速度は応力繰返し数とともに単調に増加するが, 鋭い場合は一旦速度が減少したのち増加するいわゆる変曲点がき裂進展速度曲線に存在する。

図8に鋭い切欠き材 ($\rho=0.15\text{mm}$), 図9に鈍い切欠き材 ($\rho=0.60\text{mm}$) の単一切欠きより三連切欠きまでのき裂進展速度曲線を示す。多連切欠き材の場合も単一切欠き材と同じ現象が現われることがわかる。表

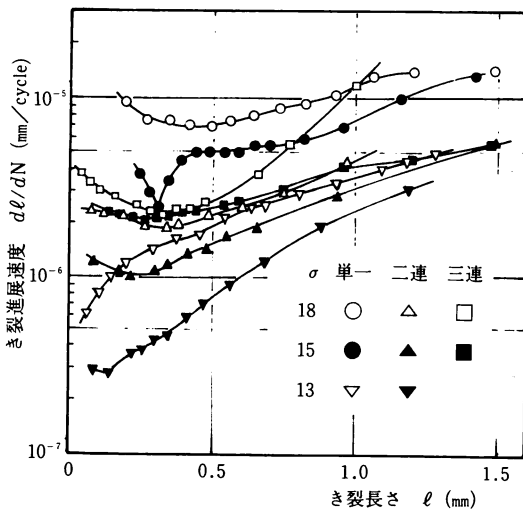


図8 き裂進展速度曲線 ($\rho=0.15$)

6に鋭い切欠き材の場合の変曲点におけるき裂長さ l_{ap} とそのときの繰返し数の全寿命に対する割合を各切欠き数について示す。表より応力が大きいほど l_{ap} は大きく切欠き数が増すほど小さくなり, また切欠きが偶数が奇数かによる差は認められない。このことは変曲点が現われる現象が停留き裂を生ずる現象と密接な関係があること⁽⁹⁾, また多連切欠き材の回転曲げ疲れにおいて停留き裂長さが偶数, 奇数に関係なく切欠き数が多くなると短くなること⁽⁴⁾と関連していると思われる。

多連になるほど停留現象の起るき裂長さが短くなるのは, 一旦切欠き先端にき裂が発生すると, 切欠き数が多くなるほど隣接する切欠きおよびき裂による干渉効果が大きくなりき裂先端における応力状態はき裂が進展しにくい状態にあり, かつ初期のき裂進展方向が横断面方向より外側に傾斜するいわゆるずれ角を生

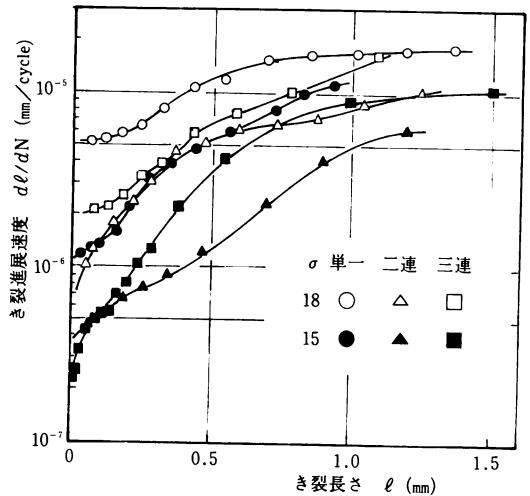


図9 き裂進展速度曲線 ($\rho=0.60$)

表6 変曲点でのき裂長さ l_{ap} と寿命比 N_{ap}/N_f

		σ (kgf/mm ²)		
		13	15	18
単一切欠き	l_{ap} (mm)	0.235	0.279	0.382
	N_{ap}/N_f	0.361	0.320	0.278
二連切欠き	l_{ap} (mm)	0.132	0.237	0.335
	N_{ap}/N_f	0.364	0.357	0.364
三連切欠き	l_{ap} (mm)	0.118	0.119	0.233
	N_{ap}/N_f	0.234	0.201	0.322
四連切欠き	l_{ap} (mm)	—	0.160	0.172
	N_{ap}/N_f	—	0.380	0.388

ずるがその値も切欠き数とともに大きくなることなどが原因していると思われる。また、切欠き数が増加することによって有効切欠き深さが減少することを切欠き深さの減少と比較して考えると、変曲点のき裂長さ l_{dp} については、切欠き深さを変えた試験片による小林らの結果⁽⁹⁾と同様の傾向を示している。しかし、多連切欠き材におけるき裂進展の停留現象は回転曲げ疲れの停留き裂の現象の場合について述べたように⁽⁴⁾切欠きの影響にき裂間の干渉が加わるので、両者を本質的に同一視することはできない。

図8において切欠き数が異っても切欠き底最大応力がほぼ等しい単一切欠き材の $\sigma = 13 \text{ kgf/mm}^2$ ($\sigma_{max} = 54.6 \text{ kgf/mm}^2$) と二連切欠き材の $\sigma = 15 \text{ kgf/mm}^2$ ($\sigma_{max} = 54.2 \text{ kgf/mm}^2$) を比較すると二連切欠きの方が繰返応力が大きいにもかかわらずき裂進展速度が小さく、干渉効果が現われている。また、最大応力が近い値を示す単一切欠きの $\sigma = 15 \text{ kgf/mm}^2$ ($\sigma_{max} = 63 \text{ kgf/mm}^2$)、二連切欠きの $\sigma = 18 \text{ kgf/mm}^2$ ($\sigma_{max} = 65 \text{ kgf/mm}^2$) および三連切欠きの $\sigma = 18 \text{ kgf/mm}^2$ ($\sigma_{max} = 60.1 \text{ kgf/mm}^2$) について比較すると、単一切欠きと二連切欠きでは σ_{max} 、 σ とも二連切欠きの方が大きいにもかかわらずき裂の進展速度は低い値を示している。また、同じ繰返し応力の二連切欠きと三連切欠きでは σ_{max} の値は三連切欠きの方が可成り低いにもかかわらずき裂進展速度は二連切欠きの方が低い値を示している。このことは前にも述べたようにき裂発生後のき裂の進展挙動には切欠き底の最大応力よりも繰返し応力の方が大きく影響すること、すなわちき裂長さがある長さに達すると切欠き底の形状による影響よりもき裂先端の形状による影響に支配されるようになり、き裂先端の形状はすべてほぼ相似であるからき裂先端の最大応力 $\sigma_{max} = \alpha' \sigma$ (α' はき裂先端の形状係数) は繰返し応力 σ によって支配されることを考えれば同じ繰返し応力における二連切欠きと三連切欠きの相違は、隣接するき裂の干渉の効果の相違によるものと考えられる。そこで単一き裂の進展に対する複数き裂の進展挙動を比較するために、図10に同じ繰返し応力における単一切欠きと二連および三連切欠きのき裂進展速度の差 $dl/dN_i - dl/dN_n$ とき裂長さ l の関係を示す。三連切欠きで $\sigma = 18 \text{ kgf/mm}^2$ の場合 $l = 0.7 \text{ mm}$ 以上のところでき裂が急激に進展した部分を除いてはそれぞれの応力において二連切欠きの方が差が大きいき裂進展速度が小さいことを示しているが、ほぼ同じ様な傾向を示している。

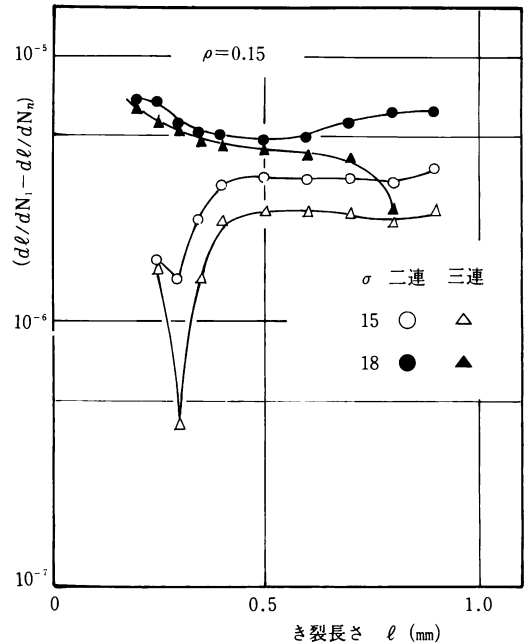


図10 き裂進展相対速度曲線

二連切欠きと三連切欠きのき裂進展挙動における相違は、二連切欠きの場合二個の平行で同じ長さのき裂はほぼ同じような速度で進展するのに対して、三連切欠きの場合中央切欠き底に発生したき裂は両外側のき裂の干渉を受けるため進展を妨げられる。その結果、二連切欠きはほぼ同じ長さの隣接するき裂の干渉を大きく受けるのに対して、三連切欠きでは隣接する中央切欠き部のき裂は短いためその応力場の影響は小さく、また他端の等長さき裂は間隔が2倍あるためその応力場の影響も小さいために干渉効果が二連切欠きの場合より小さくなり、き裂進展速度が二連切欠きよりも大きくなるものと考えられる。

多連切欠き材についても、単一切欠き材に対するBenthamの応力拡大係数の式を用いて求めた K とき裂進展速度 dl/dN の関係を単一、二連、三連切欠き材の $\rho = 0.15 \text{ mm}$ 、 0.60 mm について図11、図12に示す。

図より、単一切欠き、二連切欠き、三連切欠きのそれぞれについてはParisらの $dl/dN = CK^m$ によって整理され、単一切欠きの式による評価では多連切欠きの場合可成り安全側にあり、二連切欠きの場合特にその傾向が大きく干渉効果の大きいことを示している。しかし、応力拡大係数によって評価する場合、干渉効

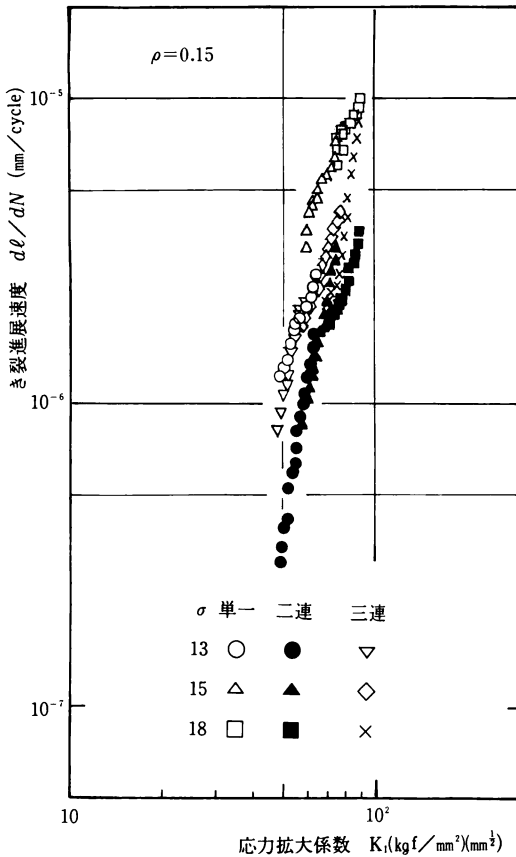


図11 応力拡大係数とき裂進展速度の関係

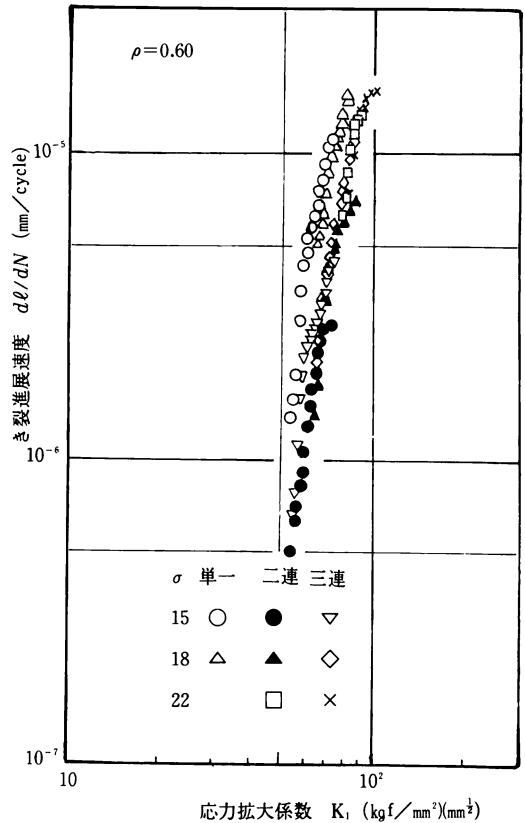


図12 応力拡大係数とき裂進展速度の関係

果の影響を考慮すれば多連切欠きの場合も含めて同じ材料、同じ負荷形式であれば同じ C , m の値、すなわち一本の直線によって整理できるはずで、前述のような隣接するき裂の干渉を受けながら進展するき裂の挙動を勘案した応力拡大係数の導入が必要と思われる。このことについては第三報で述べる。

4 結 論

単一より四連までの切欠きを持つ板状試験片の面内曲げ疲れ試験を行ない疲れ特性に及ぼす干渉の影響について調べた結果次のような結論を得た。

- 1) 追加切欠きによる干渉効果は疲れき裂の発生および進展のいずれの場合にも認められるが、切欠き数が偶数が奇数かによって異なり偶数切欠きの方が大きい。
- 2) 切欠き数が多くなるほど破断寿命に占める進展期間の割合が大きくなる。
- 3) き裂発生繰返し数は応力拡大係数によってほぼ

決まる。

- 4) き裂進展曲線に現われる変曲点でのき裂長さは切欠き数が増すほど短くなる。

文 献

- 1) 例えば 石田, 機論, 35-277 (昭44-9), 1815.
石田, 機論, 45-392 (昭54-4), 306.
- 2) 大平ら, 機論, 42-360 (昭51-8), 2281.
- 3) 新井ら, 機論, 49-437 (昭58-1), 29.
- 4) 若原ら, 機講論, 798-2 (昭54-5), 22.
- 5) 若原ら, 日本材料学会第29期総会講演論文集, (昭55-5), 185.
- 6) 若原ら, 機論, 41-352 (昭50-12), 3315.
- 7) H.Tada, P.C.Paris and G.R.Irwin, Stress Analysis of Cracks Hand Book, (1973), Del Research Corp.
- 8) 小林ら, 材料, 18-190 (昭44-7), 627.
- 9) 小林ら, 機論, 36-288 (昭45-8), 1238.