低炭素鋼切欠き材における疲労強度と疲れき裂進展のねじり予加工依存性

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 柴原, 正雄, 宮崎, 肇, Shibahara, Masao, Miyazaki, Hajime メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00011728

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.

低炭素鋼切欠き材における疲労強度と疲れき裂進展のねじり予加工依存性

柴 原 正 雄* 宮 崎 肇**

The Plastic Torsional Prework Dependence of the Fatigue Strength and Crack Propagation for Notched Low Carbon Steel Bars

by

Masao SHIBAHARA and Hajime MIYAZAKI

Abstract

In respect of the improvement of the fatigue strength, it is well known that the plastic prework is effective. But it seems that the effect of the plastic preworking on the fatigue strength and the propagative behavior of the fatigue crack are hardly studied under consideration of mutual relations.

Therefore, in this paper, for the plastic torsional preworked circumferentially notched bar of S17C (JIS G 4051), the prework dependence of the fatigue strength under rotary bending tests was studied and that of the propagative behavior of the fatigue crack was discussed by means of the result of Liu's dimensional analysis and stress intensity factor.

The following conclusions can be drawn:

(1) The suitable plastic torsional prework is effective in increasing the fatigue limit of the smooth and notched specimens, but the excessive preworking tends to decrease it. And the smooth specimen is more effective than notched one in increasing the fatigue limit.

(2) The index number of stress intensity factor is from 2.48 to 0.98, and decreases in according to the rate of preworking.

(3) The occurence of the fatigue crack is most delayed and the crack propagation speed is the slowest for the notched specimen which is preworked at the nearly most suitable degree in increasing the fatigue limit.

1. 緒 言

疲れ強さの改善については，従来より高周波焼入れ，浸炭などの熱処理をはじめ，ショットピーニングやその他の塑性予加工を施すこと[1]が，材質や作用応力に応じてそれぞれ有効であることは周知のところである。しかしながら，ねじり予加工が疲労強度およびき裂進展に及ぼす影響につき検討し，

* 機械工学科 **大学院学生

それらの相互関連において予加工効果を論じたものは少ないように思われる。筆者の1人は，さきに欠陥材の塑性ねじり予加工依存性につき報告したが[2]，本研究では，低炭素鋼丸棒の環状V形みぞ付切欠き材にねじり予加工を与えたものを対象とし，繰返し回転曲げ疲労強さと疲れき裂進展挙動の予加工依存性につき吟味検討を行った。すなわち，鋭い切欠きを持つ材料では，巨視的疲れき裂の進展期間が疲れ寿命の大部分を占めるものであるため，疲れ特性を知る上でき裂の発生とその進展状況を明らかにすることは，きわめて重要であり，塑性予加工効果の有意性もここに見出されるものと思われる。

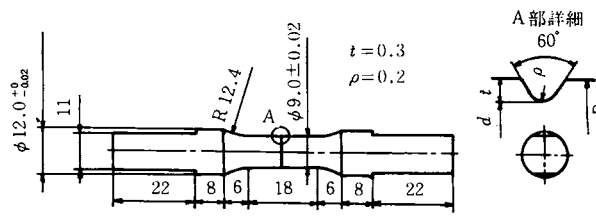
本実験では，酸化着色法を用いて切欠き材におけるき裂の発生および進展状況を観察し，Liu[3] の次元解析により得られた関係によってまず整理検討を試みた。また Irwin[4] によって提唱され，後に Paris[5] らにより疲れき裂進展の問題に適用された応力拡大係数の概念を用いても疲れき裂の進展挙動における予加工依存性につき検討を試みた。

2.　供試材と試験片

供試材は機械構造用炭素鋼 S17C 相当材で，その化学成分を第1表に，また焼なまし後の機械的性質を第2表に示す。試験片は，表面仕上げ状況が疲れ強さに影響を及ぼすことを考慮し，第1図に示す形状に加工後は，加工硬化層および圧縮残留応力を除去するため，表面に 10～20μm の電解研磨を施して仕上げた。なお，この切欠きに対する形状係数は Neuber の三角則によれば $\alpha=2.77$ となる。

第1表　供試材料の化学成分（%）

C	Si	Mn	P	S
0.18	0.04	0.67	0.01	0.018



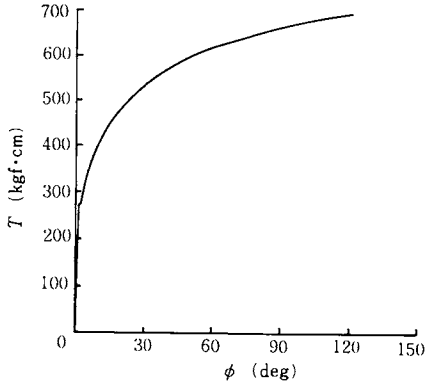
第1図　疲れ試験用試験片

第2表　供試材料の機械的性質

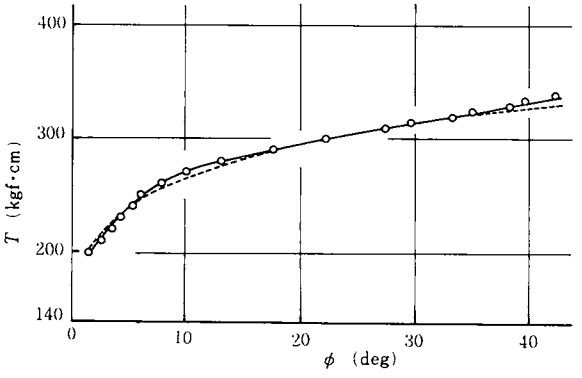
引張強さ σ_B kgf/mm^2	降伏点 σ_S kgf/mm^2	破断強さ σ_Z kgf/mm^2	真破断強さ σ_T kgf/mm^2	伸び δ %	絞り ψ %	硬さ H_RF
41.21	26.35	28.05	84.81	62.23	67.04	94.8

3.　予加工トルクと塑性せん断ひずみ

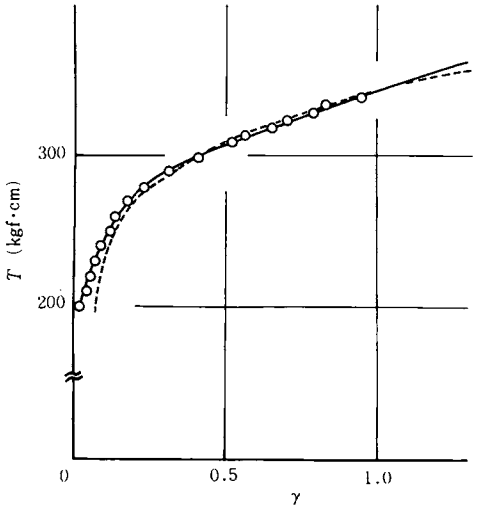
予加工として塑性ねじりを与え，その予加工度をせん断ひずみで示すに際し，まず供試材における負荷トルク T とせん断ひずみ γ の関係を明らかにしておく必要がある。基準となる平滑材の場合の外皮せん断ひずみは，標点間（4.4 mm）のねじれ角と負荷トルクの関係をあらかじめ求めておき（第2図参照），$\gamma=\pi\cdot\phi(T)\cdot D/360L$（$L$：標点間距離，$D$：試験片直径，$\phi$：ねじれ角）によってトルク—せん断ひずみの関係を得た。一方，切欠き材では，切欠き底におけるせん断ひずみと負荷トルクの関係は，切欠き底に軸方向の細線をひき，トルク上昇によるその傾きを工具顕微鏡により測定し，第3図および第4図（破線は近似曲線）の関係を得た。以上の結果を第3表に示す。なお，せん断応力 τ_R と γ



第2図　平滑材の負荷トルクとねじれ角の関係



第3図　切欠き材の負荷トルクとねじれ角の関係



第4図　切欠き材の負荷トルクと切欠き底せん断ひずみの関係

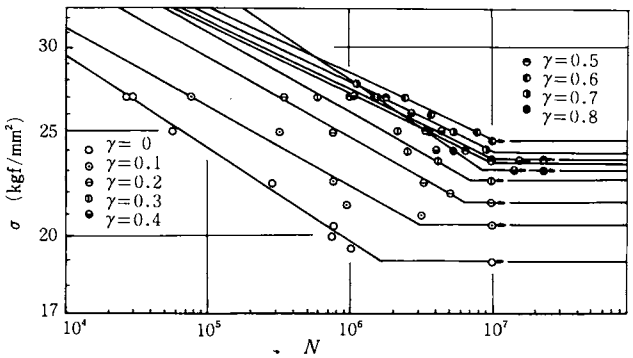
第3表　平滑材および切欠き材の予加工度に対する負荷トルク T (kgf·cm) およびせん断応力 τ_R (kgf/mm²) の値

γ	平滑材		切欠き材	
	T	τ_R	T	τ_R
0.1	328.0	19.25	244.0	16.97
0.2	412.0	23.50	273.8	18.87
0.3	460.0	26.33	288.2	19.70
0.4	497.5	28.06	298.8	20.32
0.5	524.5	29.67	307.7	21.02
0.6	547.5	30.88	316.0	21.75
0.7	567.5	31.93	324.0	22.45
0.8	582.5	33.20	331.5	23.11

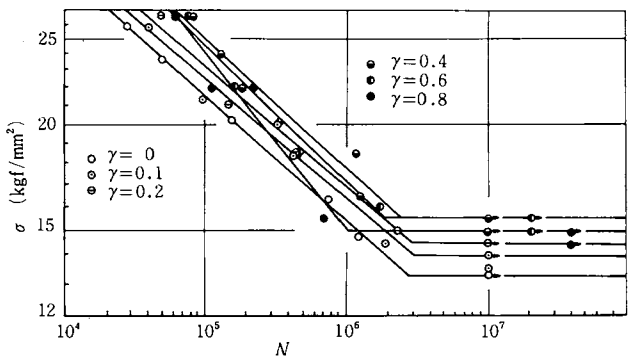
の関係については，$\tau_R=4(\theta\dfrac{dT}{d\theta}+3T)/\pi D^3$（Prandtl の式）より求めた。ただし，切欠き材では $D=d$（切欠き底直径）とした。試験片に対する予加工の均一化を図るため，ねじり予加工は $\gamma=0.1$ につき約6分間の割合で注意深くねじり試験機を用いて実施した。なお，予加工前後の切欠き底形状の変化についても十分吟味を加えたが，本実験の範囲ではほとんど認められない程度であった。

4.　疲れ強さの予加工依存性

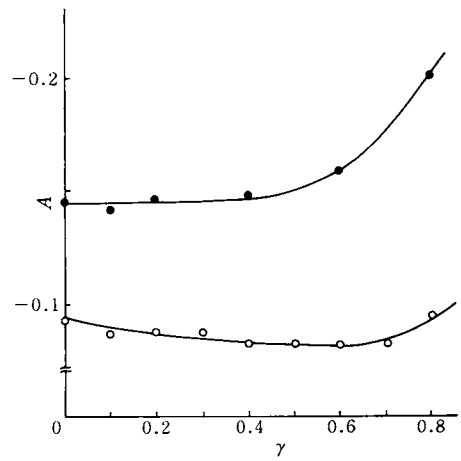
疲労試験は，予加工を与えた試験片の疲れ強さがいかに変化向上するかをまず検討するため，平滑材と切欠き材の両者につき小野式回転曲げ疲労試験機を用いて実施した。回転速度は毎分3,600回転である。第5，6図に平滑材および切欠き材に対する繰返し応力と破断までの繰返し数の関係を示す S—N 線図を各予加工度 γ をパラメータとして示した。これら S—N 線図の時間強さの部分における傾き A と予加工度 γ の関係を吟味すれば第7図のようになる。すなわち，平滑材と切欠き材を比較す



第5図　予加工平滑材のS−N線図



第6図　予加工切欠き材のS−N線図

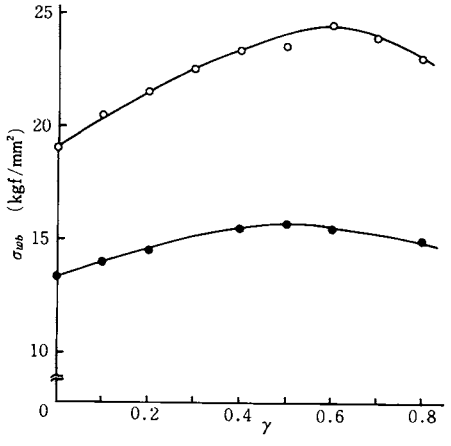


第7図　S−N線図の時間強さの部分における傾きと予加工度の関係

○印は平滑材
●印は切欠き材

れば，両者とも $\gamma=0$ から疲労限度が最高となる予加工度まではほぼ平行的に変化はしているが，どちらかといえば平滑材の場合にはわずかながら徐々に傾きが緩やかになるのに対し，切欠き材では多少の増加傾向を示すといえよう。しかし，それ以上の γ に対しては，両場合とも明らかに傾きは大きく増加する傾向となっている。したがって，過度の予加工が与えられれば，両者とも高応力よりも低応力を繰返し受ける場合が悪影響を受け易いことがわかる。また，疲れ強さの予加工依存性を明らかにするため，第8図に平滑材および切欠き材の予加工度 γ と疲労限度 σ_{wb} の関係を示し，第4表にはそれらの値と $\gamma=0$ の場合に対する上昇率を示した。以上の結果より，ねじり予加工を与えれば，その予加工度に応じてある限度までは疲労限度は上昇し，それ以上の予加工に対してはかえって疲労限度は低下するものであることは明らかであり，本実験範囲の平滑材の場合では，その疲労限度が最高となる $\gamma=0.6$ 近辺において上昇率は29.5%に達するのに対し，切欠き材では最高となる $\gamma=0.5$ 程度において17.7%の上昇に止まることがわかる。よって，切欠き材では，平滑材に比して疲労限度の予加工依存性の少ないことが確認される。

なお，一般に，疲労強度の上昇は，予加工によって生ずる残留応力の作用と組織変化による加工硬化の効果とされている[6]。よって本場合の繰返し回転曲げ疲労試験における負荷応力状態に及ぼす表面残留応力の影響につきまず考察してみる。いま曲げによる応力 σ に残留応力成分 τ_a を考慮すれば，せん断応力成分は $\tau_{amp}=\sqrt{(\sigma/2)^2+\tau_a^2}$，垂直応力成分は $\sigma_{amp}=\sigma/2+\sqrt{(\sigma/2)^2+\tau_a^2}$，また $\sigma_{\max}$ ならびに $\sigma_{\min}$ の軸に対する方向角は $\psi_{\max}=\frac{1}{2}\tan^{-1}(2\tau_a/\sigma)$, $\psi_{\min}=-\frac{1}{2}\tan^{-1}(2\tau_a/\sigma)$ となる。しかし同一面上での応力振幅の最大値が負荷応力 σ となることを考えれば，上式で示した応力振幅は実際には意味がなく，ねじり予加工による残留応力は回転曲げ疲労強度にはほとんど影響を与えないものと考えてさし



第8図　予加工材の予加工度と疲労限度 σ_{wb} の関係
○印は平滑材
●印は切欠き材

第4表　平滑材および切欠き材の各予加工度における疲労限度 σ_{wb} (kgf/mm²) および $\gamma=0$ の場合に対する上昇率(%)

γ	平滑材		切欠き材	
	σ_{wb}	上昇率	σ_{wb}	上昇率
0	18.94	—	13.34	—
0.1	20.47	8.1	14.0	4.9
0.2	21.53	13.7	14.5	8.7
0.3	22.49	18.7	—	—
0.4	23.36	23.3	15.5	16.2
0.5	23.57	24.1	15.7	17.7
0.6	24.52	29.5	15.5	16.2
0.7	23.91	26.2	—	—
0.8	23.05	21.7	15.0	12.4

つかえない。つぎに，組織変化による加工硬化の異方性につき考慮すれば，ねじり予加工を与えたものはねじり方向と逆方向のねじりに対してはバウシンガ効果が現われるはずであるが，引張り圧縮に対しては降伏点の上昇が生ずることになる。したがって，ねじり予加工材の加工硬化の異方性は，繰返し回転曲げ疲労における応力—ひずみ関係のヒステリシス・ループの形状に影響を与えることになり，これが本場合の疲労強度上昇の主因となるものと思われる。

5.　切欠き材におけるき裂伝ぱの予加工依存性

予加工材の疲労強度の向上あるいは低下に対し，疲労き裂の挙動がいかなる因果関係にあるかを検討するため，切欠き材では巨視的疲れき裂の進展期間が疲れ寿命の大部分を占めるものであることより，本研究ではまず切欠き材を対象とすることにした。すなわち第6図の $S-N$ 線図より，繰返し負

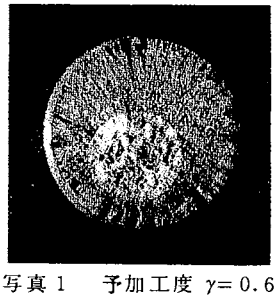
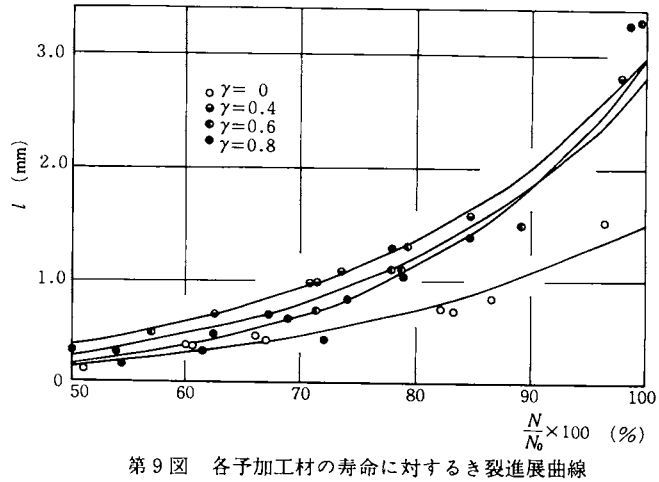


写真1　予加工度 $\gamma=0.6$ における酸化着色断面



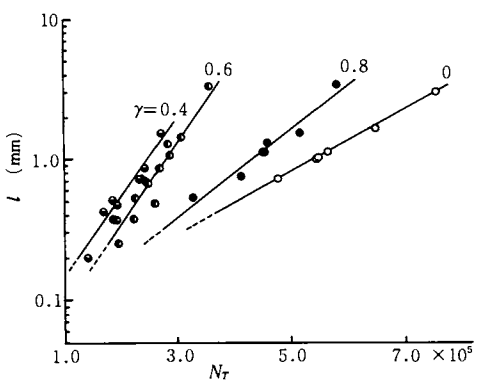
第9図　各予加工材の寿命に対するき裂進展曲線

荷公称応力として $\sigma=18.5$ kgf/mm² を選定し,この場合における各切欠き供試材でのき裂の進展状況を酸化着色法により観察，測定した。一例として $\gamma=0.6$ の供試材における着色断面を写真1に示す。また第9図に各予加工度の供試材につき得られた寿命（$N/N_0\times100$）における疲れき裂の進展パターンを示した。図の縦軸は，き裂深さ l (mm) であり，全寿命 N_0に対して巨視的疲れき裂の進展期間は，50%以上を占めていることが確認された。ここで，実験での各予加工度供試材の破断繰返し数 N_0は必ずしも前記の S—N 線図より得られる推定破断繰返し数 N_P とは一致しないが，予加工度が等しければ同一応力下においては破断繰返し数N_0 に対する同一割合の時点（寿命%）におけるき裂の発生，進展パターンは同じであると考え，$N_T=N_P\times N/N_0$ を導入し，これとき裂深さ l の関係よりき裂の発生および進展につき考察することとした。

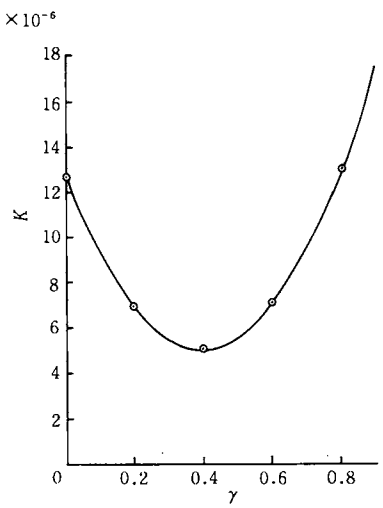
さて，疲れき裂の進展曲線には従来種々の表示方法があり[7]，き裂進展速度に及ぼす影響因子を解明する表示手法が試みられているが，ここでは以下に述べる2種類の表示方法によって予加工依存性の吟味検討を試みた。すなわち，まず，Liu の次元解析によって得られた式[3]

$$dl/dN_T=Kl \tag{1}$$

を適用した。ここに，K は応力や材料に関する定数とされており，上式の妥当性を検討するため，$\log l$ と N_T の関係を図示してみたのが第10図である。図より明らかなように，両者間にはほぼ直線関係が得られ，K 値が決定できる。第11図に K 値と予加工度 γ の関係を示した。これより，同一深さにおけるき裂の進展速度は，予加工を加えるに従って減少し，$\gamma=0.4$ 近辺で最小となり，さらに γ を増加させれば再び上昇するものであることが認められる。



第10図　各予加工材の繰返し数とき裂深さの関係



第11図　切欠き材のき裂進展速度がき裂深さに比例すると考えた場合の予加工度に対する比例定数の変化

つぎに，応力拡大係数による破壊力学に基づく解析法が疲れき裂の進展特性をよく表示することができるとされており[5),7)]，本考察でも

$$dl/dN_T=C(K_{\mathrm{I}})^n \tag{2}$$

を用いて整理検討を試みた。ここに，K_{I}はモードⅠ（開口形）に対する応力拡大係数で，指数の n 値については，$n=4$ が広域特性を最もよく示すという理由で Paris らにより "4乗則" が提案されたが，Paris 自身も含め多くの実験により n 値はその材料および繰返し負荷状態によって $n=0.5\sim8$ 程度の広い範囲の値をとり得ることが指摘されている[8)]。よって，本実験による n 値を求めるため，K_{I}

として小林・中沢の回転曲げの場合の式[9),10)]

$$K_I=\sqrt{\pi a(t+l)/\{0.8a+7.1(t+l)\}}\cdot\sigma_N \tag{3}$$

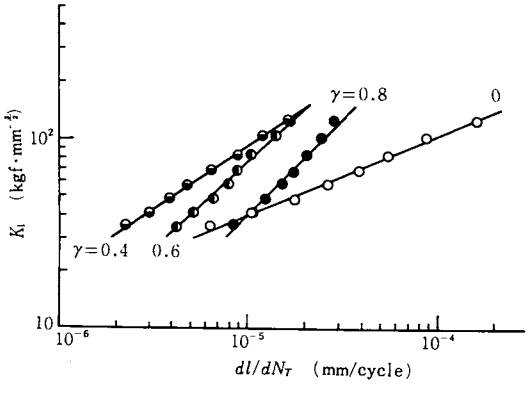
を用いた。ここで，a はき裂底半径，t は切込み深さ，l はき裂深さ，σ_N はき裂底の公称応力である。なお K_I の計算としては，Benthem が三次元曲げについて示した次式[11)] も適用して吟味してみた。

$$K_I=\sigma_N\sqrt{\pi a}\cdot F_1(\xi) \tag{4}$$

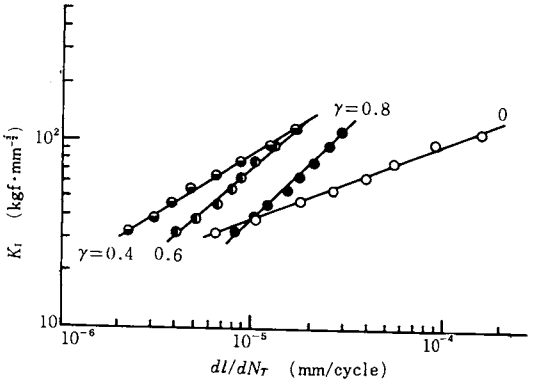
ただし，

$$\sigma_N=4M/\pi a^3,\ F_1(\xi)=G(\xi)\sqrt{1-\xi},\quad \xi=2a/D$$

$$G(\xi)=\frac{3}{8}\{1+\frac{1}{2}\xi+\frac{3}{8}\xi^2+\frac{5}{16}\xi^3+\frac{35}{128}\xi^4+0.537\xi^5\}$$



第12図(a)　各予加工切欠き材のき裂進展速度と小林・中沢による応力拡大係数の関係

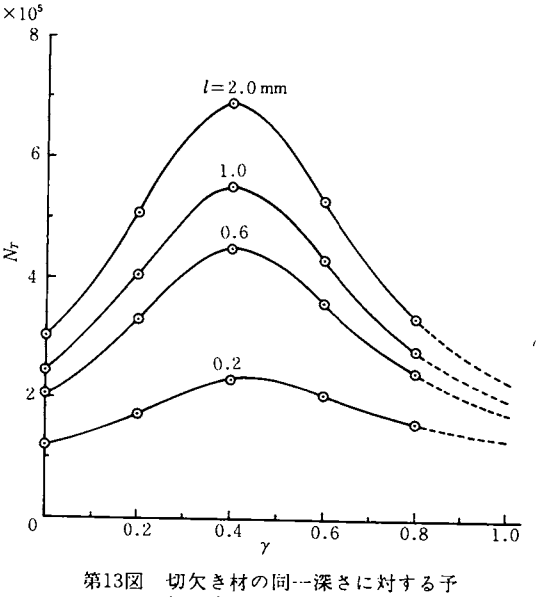


第12図(b)　各予加工切欠き材のき裂進展速度とBenthem による応力拡大係数の関係

第5表　n 値の比較

γ	小林・中沢の式	Benthem の式
0	2.479	2.381
0.4	1.558	1.508
0.6	1.084	1.057
0.8	0.984	0.955

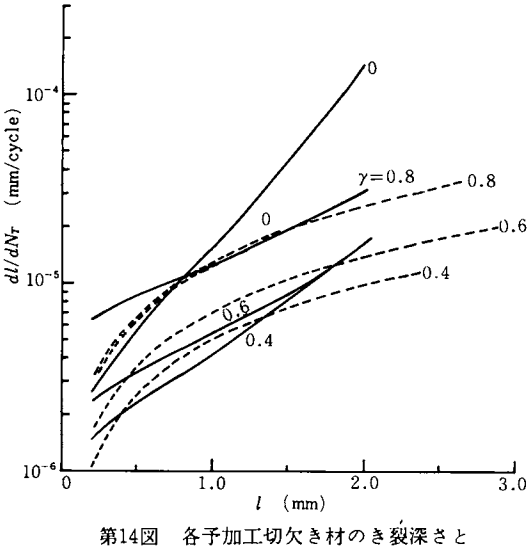
以上両者の K_I による整理の妥当性を検討するため，第12図に K_I とき裂進展速度 dl/dN_T の関係を両対数上に図示してみた。(a)図は式(3)による場合であり，(b)図は式(4)によるものであるが，両者ともほぼ直線関係の得られることが確認され，したがって n 値が決定される。第5表に両場合に対する n 値を示した。両者はほぼ一致する値となっているが，小林・中沢による K_I で整理した場合がやや高い値となることがわかる。また予加工度 γ と n 値の関係については，γ の増加，



第13図　切欠き材の同一深さに対する予加工度と繰返し数の関係

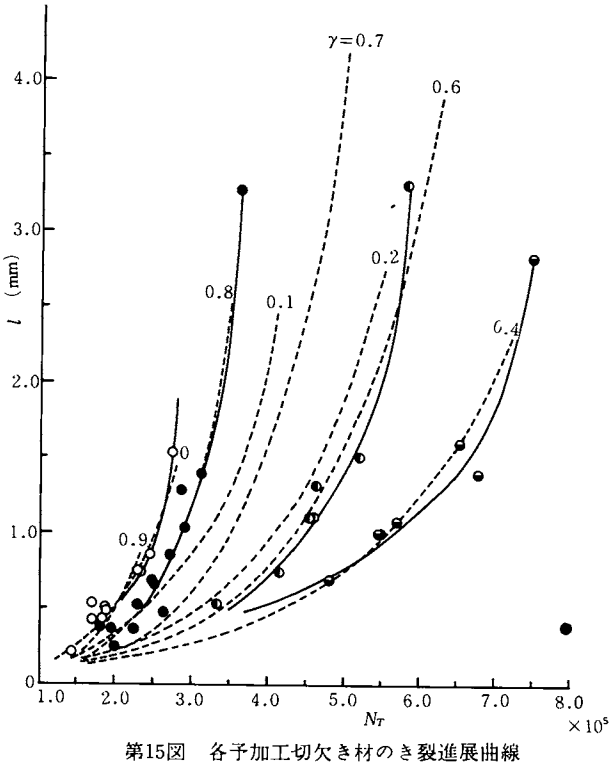
すなわち降伏点の上昇に伴って n 値の減少することも確認される。

以上, Liu による解析の方法および応力拡大係数による整理を試みたのであるが, ここでこれらの表示方法から導出される各予加工度におけるき裂進展挙動につき検討してみる。まず第13図に同一き裂深さに対する予加工度と繰返し数の関係を示した。これより，各き裂深さに対しては，$\gamma=0.4$ あるいはわずかにこれを上回る程度の予加工度を与えた場合が最も繰返し数が大きく，それ以上の予加工を与えればかえって繰返し数が減少するものであることが明らかである。つぎに，き裂深さとき裂進展速度との関係を第14図に示してみた。鋭い切欠き材の場合には，き裂進展速度 dl/dN_T が減少する段階（第I期間）と増大する段階（第II期間）が存在し，第II期間における疲れき裂進展速度が応力拡大係数で整理可能であるとする結果も報告されているが[12),13)], 本場合では第I期間の存在は不明確である。しかし，き裂の進展挙動を知る上で，第II期間における挙動を比較検討することはきわめて有用であり，これより疲れき裂進展の予加工依存性を吟味把握することは可能であると思われる。本実験のき裂進展曲線を予加工度 γ をパラメータとして示したのが第15図である。実線は実験曲線, 破線



第14図　各予加工切欠き材のき裂深さとき裂進展速度の関係

（実線は SIF による解析，破線は Liu の次元解析）



第15図　各予加工切欠き材のき裂進展曲線

（実線は実験曲線，破線は Liu の式より得られる曲線）

は Liu の式より得られるき裂進展曲線を示している。これより，$\gamma=0.4$ 程度の予加工度においてはき裂の発生時期およびき裂発生後のき裂進展速度が最も遅いことがわかる。また，予加工度を増加させ，$\gamma=0.9$ とした場合には，予加工を与える前の状態よりもき裂発生時期が早くなり，かつ同一深さにおけるき裂進展速度も増加し，したがって，破断繰返し数が $\gamma=0$ の場合に比して，かえって減少していることが認められる。以上により，$\gamma=0.4$ あるいはわずかにこれを上回る程度が最適予加工度であり，疲労試験結果もこの程度の予加工で最大の疲労限度に達していることの根拠の1因子が明らかにされたわけである。また予加工度が $\gamma=0.9$ 以上にもなれば，予加工を施さない場合よりもかえって悪影響を及ぼすことになると言え，これはもちろん過度の予加工により，材料がぜい性的挙動を示す

ために外ならない。

6. 結　　言

本実験では，平滑丸棒および $\alpha=2.77$ の環状V形みぞ付丸棒切欠き試験片 S17C 相当材に適当なねじり予加工を与え，それらの回転曲げ疲れ試験を行うことにより，まず塑性ねじり予加工の疲れ強さに及ぼす影響につき検討した。ついで，切欠き材を対象として酸化着色法により疲れき裂進展の予加工依存性を吟味した。以上の結果より，つぎの事項が明らかとなった。

(1) 平滑材では $\gamma=0.6$ 程度が，また切欠き材では $\gamma=0.4\sim0.5$ が最適予加工度であり，これ以上の予加工を与えれば疲れ強さの低下をきたす。

(2) 疲れ強さに及ぼす予加工依存性については，平滑材の場合，$\gamma=0$ の疲れ強さに比べ約30%の上昇が得られるのに対し，切欠き材では約18%の上昇にとどまった。したがって，切欠き材では平滑材に比して疲れ強さに及ぼす予加工依存性の少ないことが確認された。

(3) 予加工切欠き材の疲れき裂進展速度につき，Liu の次元解析による式および応力拡大係数による整理を試みた結果，後者の指数に対し，本場合では $n=2.48\sim0.98$ という比較的低い値を得た。また，予加工の増加，すなわち降伏点の上昇に伴って n 値の減少することが確認された。

(4) 公称繰返し応力 $\sigma=18.5$ kgf/mm² における予加工切欠き材の疲れき裂の発生時期およびき裂発生後のき裂進展速度は，疲労限度の上昇に最適である予加工付近で最も遅く，したがって破断繰返し数，すなわち時間強さも最高となる。しかしそれ以上の予加工を与えるに従って破断繰返し数は低下し，$\gamma=0.9$ に至れば予加工を施さない場合よりもかえって低下することが推定された。

終りに，実験実施に助力および協力された川本技官ならびに松島幸三君に感謝し，また文献や討論をいただいた米谷教授に謝意を表します。

文　　献

1）例えば，光永・福武，機械学会論文集，**39**-317（昭48-1），42．小林・中沢ら，機械学会論文集，**43**-366（昭52-2），416．
2）柴原・野島，金沢大学工学部紀要，**9**-1（昭50-3），47．
3）Liu, H.W., Trans. ASME, Ser. D, **83**-1(1961-3), 23.
4）Irwin, G.R., ASTM. STP. No. 381(1965).
5）Paris, P.C. & Erdogan, F., Trans. ASME, Ser. D, **85**-4(1963-12), 528.
6）例えば，林・土居，材料，**20**-219（昭46-12），1300．
7）中沢・小林，機械の研究，**20**-4（1968），603．
8）北川，機械学会誌，**75**-642（昭47-7），70．
9）小林・中沢，材料，**18**-190（昭44-7），627．
10）小林・中沢，機械学会論文集，**36**-288（昭45-8），1238．
11）Tada, H., Paris, P.C. & Irwin, G.R., The Stress Analysis of Cracks Handbook, (1973), 27.2. Del Research Corporation.
12）中川・福原，機械学会論文集，**41**-345（昭50-5），1317．
13）若原・末永，機械学会論文集，**41**-352（昭50-12），3315．

（昭和52年9月28日受理）