

The Torsional Prework Effect on the Fatigue Strength and Creak Propagation

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Shibahara, Masao, Miyazaki, Hajime メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00011703

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



疲労強度およびき裂進展に及ぼすねじり予加工効果

柴 原 正 雄* 宮 崎 肇**

The Torsional Prework Effect on the Fatigue Strength and Crack Propagation

by

Masao SHIBAHARA and Hajime MIYAZAKI

Abstract

The effect of torsional prework on the fatigue strength and crack growth for smooth specimen is compared with the previous results for notched specimen in plane carbon steel. A theoretical reduction factor, which denotes the decreasing extent of the crack growth rate arisen from the prework, is introduced by taking the hysteresis loop near the crack tip into account, and compared with the experimental one. The fracture surfaces are observed under a scanning electron microscope.

The following conclusions were obtained;

- (1) The rate of increase in the fatigue strength with the extent of prework is greater for the smooth specimen than for the notched one.
- (2) Under the same stress intensity factor, the crack growth rate for the smooth specimen is greater than that for the notched one in relatively low ranges of the extent of prework, but at or near some degree of prework which the fatigue strength is reversed in order each other, this behavior of the crack growth is reversed, too.
- (3) The theoretical reduction factor fairly coincides with the experimental result in relatively low ranges of the extent of prework.
- (4) The typical fracture markings such as striation, quasi-striation, tire track and so on are observed for all the preworked specimens.

1 緒 言

筆者らは、塑性予加工による疲労強度の改善に関する基礎的研究として、機械構造用炭素鋼S17C相当材の平滑丸棒および環状V形みぞ付丸棒の繰返し回転曲げ疲労強さに対する塑性ねじり予加工依存性と切欠き材の疲労き裂進展挙動の予加工依存性について報告した¹⁾。本研究では、同一材料の平滑材についてのき裂進展挙動を調べ、ねじり予加工が疲労強度およびき裂進展に及ぼす影響とそれらの相互関連において予加工効果を平滑材と切欠き材につき比較検討を行った。すなわち、前報と同様、Φ9mm の供試片にねじりの塑性予加工を与えて繰返し回転曲げ疲労試験を実施し、酸化着色法を

* 機械工学科 ** 諏訪精工舎

用いて疲労き裂の進展状況を観察し, Liu の次元解析により得られた関係²⁾によってまず整理検討を試み, また, Irwin によって提唱され³⁾, 後に Paris⁴⁾ らにより疲労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労き裂進展挙動における予加工効果につき吟味, 検討を加えた。さらに, き裂先端でのヒステリシスループを考慮することにより得られるき裂の進展速度減少係数と実験値との比較も試み⁵⁾, また, 疲労破壊過程および破壊機構の吟味のため, 走査電子顕微鏡による疲労破面の観察も実施した。

2 時間強度の予加工依存性

S17C (JIS G 4051) 相当丸棒材に対する疲労限度のねじり予加工依存性は前報で論じられたが¹⁾, 本報ではき裂進展挙動との相互関連においてねじり予加工効果を比較検討するため, ある設定繰返し回転曲げ負荷公称応力における時間強度 N_P (破断寿命)

とねじりのせん断ひずみ γ で表わされた予加工度の関係を前報で得られている S-N 線図より求め, 図 1 に示した。ここでの設定応力は, 平滑材と切欠き材とも, 各無加工材の場合の疲労限度に対して同一割合の応力となるように選定した。すなわち, 前報切欠き材の場合は $\sigma = 18.5 \text{ kgf/mm}^2$ としたので, 本報平滑材に対しては $\sigma = 26.27 \text{ kgf/mm}^2$ である。図より平滑材 (○印) と前報の切欠き材 (●印) を比較すれば, 両者ともねじり予加工を与えると, その加工度 γ に応じてある限度までは時間強度は上昇し, それ以上の γ に対してはかえって時間強度は低下するものであることは明らかであり, 前者の場合は $\gamma = 0.6$ 近辺において, 後者の場合は $\gamma = 0.4 \sim 0.5$ において時間強度は最高となることが確認される。また平滑材は切欠き材に比して時間強度の予加工依存性が大きく, $\gamma = 0.25$ 程度以上の予加工に対して平滑材は切欠き材の時間強度を上回ることが認められる。

このような予加工材の疲労強度の向上あるいは低下に対し, 疲れ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, 各平滑予加工材でのき裂進展状況を前報同様酸化着色法で得られた結果により吟味した。なお, 各予加工度におけるき裂進展挙動をより的確に考察するため, 破断繰返し数 N_0 が推定破断繰返し数 N_P と一致しない場合でも, N_0 に対する同一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

$$N_T = N_P \times (N/N_0) \quad (1)$$

を導入し, これとき裂深さ l の関係を取り扱ったことも前報と同様である。

3 疲労き裂の進展に及ぼす予加工効果

平滑材の疲れき裂進展挙動に対しても, 切欠き材の場合と同様, Liu²⁾ の次元解析による次式を適用した。

$$dl/dN_T = Cl \quad (2)$$

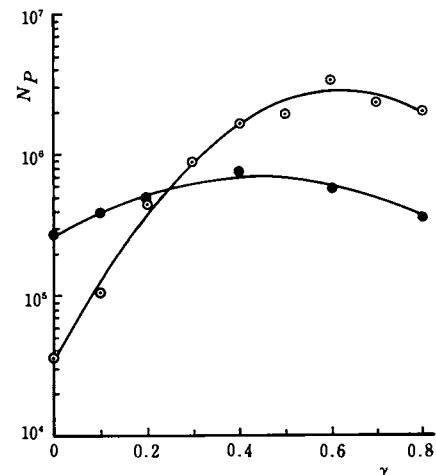


図 1 予加工材の予加工度と時間強度の関係
(○印は平滑材, ●印は切欠き材)

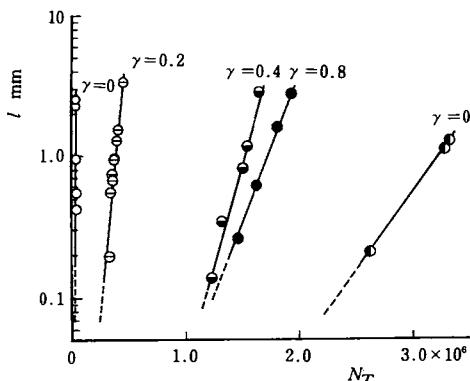
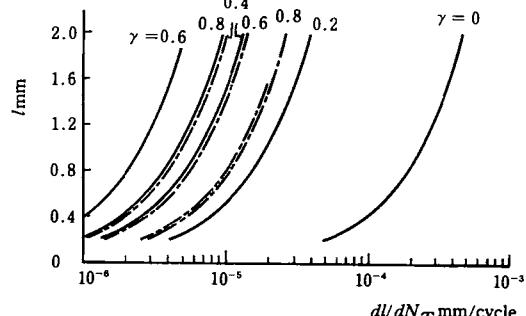


図2 予加工平滑材の繰返し数とき裂深さの関係

図3 各予加工材におけるき裂深さとき裂進展速度
(実線は平滑材, 鎮線は切欠き材)表1 各予加工材の $l = 0.2\text{mm}$ における繰返し数と寿命

予加工度 γ	平 滑 材		切 欠 き 材	
	繰返し数	寿 命	繰返し数	寿 命
0	2.46×10^4	70.2 %	1.23×10^5	45.2 %
0.2	2.99×10^5	79.0 %	—	—
0.4	1.27×10^6	77.9 %	2.29×10^5	33.1 %
0.6	2.58×10^6	91.8 %	2.14×10^5	34.9 %
0.8	1.37×10^6	71.8 %	1.62×10^5	44.4 %

ここで、 C 値は応力や材料に関する定数である。これより、き裂進展曲線を求めれば

$$\log l - \log l_0 = C (N_T - N_0) \quad (3)$$

となり、ある初期条件 l_0, N_0 を基準に考えれば $\log l$ と N_T が直線関係を示すはずである。本報の平滑材に対する上式の妥当性を検討するため、両者の関係を図2に示した。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、前報切欠き材と同様、式(2)による整理の妥当性が確認される。よって、式(3)より得られるき裂長さ $l=0.2\text{mm}$ における繰返し数及びその時の推定破断繰返し数 N_P に対する寿命を表1に示した。これより、平滑材ではき裂の発生は切欠き材に比してかなり遅く、逆に切欠き材では寿命の大部分がき裂の進展に費やされていることが明らかである。図3は、式(2)より導出されるき裂深さとき裂進展速度との関係を予加工度 γ をパラメータとして示したものである。これより、実線の平滑材では $\gamma=0.6$ 近辺において、一方、鎮線の切欠き材では $\gamma=0.4$ 近辺において、同一深さにおけるき裂の進展速度が最も遅く、このことは図1における時間強度 N_P と γ の関係に一致している。

しかし、平滑材と切欠き材を比較する場合、両者の同一き裂深さにおけるき裂先端での力学的環境は異っており、図3において両者を直接比較する場合には、その意味での注意が必要なことはもちろんである。したがって、き裂先端での力学的環境を表示する応力拡大係数の概念を導入して両者を比較することとする。すなわち、疲労破壊がき裂先端での非常に局所的な事象であることを考慮すれば、き裂先端での力学的環境を表示する応力拡大係数の概念を疲れき裂進展の問題に適用することも可能

表2 き裂進展速度の応力拡大係数による表示式(4)に対する係数と指数値

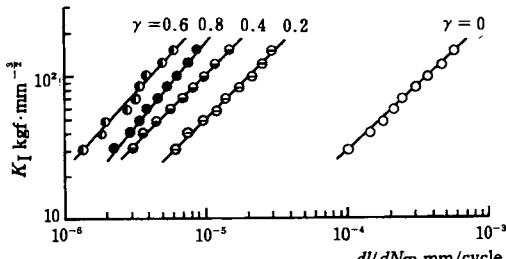


図4 予加工平滑材におけるき裂進展速度と応力拡大係数の関係

予加工度 γ	平滑材		切欠き材	
	D 値	n 値	D 値	n 值
0	10 ^{-5.58}	1.07	10 ^{-8.91}	2.48
0.2	10 ^{-6.76}	1.03	—	—
0.4	10 ^{-7.08}	1.03	10 ^{-8.00}	1.56
0.6	10 ^{-7.28}	0.95	10 ^{-7.00}	1.08
0.8	10 ^{-6.88}	0.84	10 ^{-6.55}	0.98

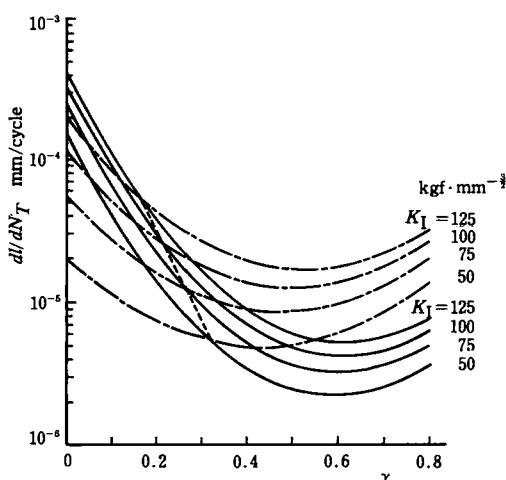


図5 各予加工材における予加工度とき裂進展速度の関係(実線は平滑材, 鎮線は切欠き材)

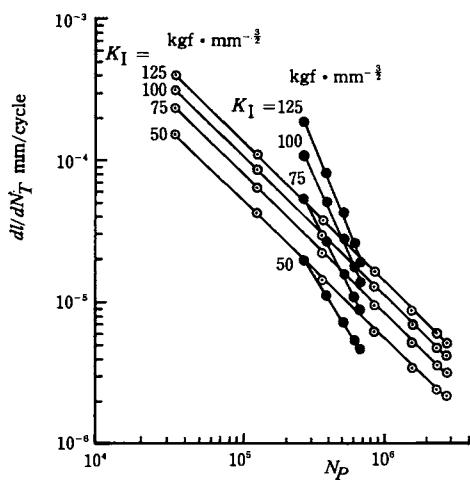


図6 各予加工材における時間強度とき裂進展速度の関係(◎印は平滑材, ●印は切欠き材)

であり, Paris⁴⁾ はき裂進展速度 dI/dN_T と応力拡大係数 K との関係を

$$dI/dN_T = DK^n \quad (4)$$

とおいている。ここでも、切欠き材の場合と同様、平滑材に対する上式適用の妥当性を検討するため、図4に応力拡大係数とき裂進展速度の関係を両対数上に図示してみた。図より明らかなように、ほぼ直線関係の得られることが確認され、得られた n の値を切欠き材の場合とともに表2に示した。これより、 n 値は平滑材では切欠き材に比して低く、かつ予加工による変化割合の小さいことがわかる。また、両者とも γ の増加、すなわち降伏点上昇に伴って減少することが確認される。ここで、応力拡大係数をパラメータとし、予加工度 γ とき裂進展速度 dI/dN_T の関係を検討すれば図5のようになる。これより、同一 K_I 値(モードIに対する応力拡大係数)におけるき裂進展速度は、Liuの式による整理の場合とほぼ同様に、実線で示す平滑材では $\gamma = 0.6$ 付近で、一方、鎮線で示す切欠き材では $\gamma = 0.4 \sim 0.5$ において最も遅くなることが確認される。このことは、図1において同様の予加工度における時間強度が最高値を示すことに一致する。ここで、平滑材と切欠き材を比較すれば、図中の破線を境界として、同一 K_I 値に対するき裂進展速度が逆転していることがわかる。すなわち、き裂先端の等価な

力学的環境に対しては、破線より低い予加工度では切欠き材のき裂進展速度は平滑材に比して遅く、逆に破線より高い予加工度では平滑材の方が遅くなることがわかる。したがって、図1において、 $\gamma = 0.25$ 程度で平滑材と切欠き材の時間強度の逆転していることの根柢の一因子が明らかにされたわけである。

なお、図6は、応力拡大係数をパラメータとして時間強度 N_P とき裂進展速度 dl/dN_T の相互関係を示すもので、平滑材(○印)、切欠き材(●印)とも、両対数上ではほぼ直線関係が得られている。したがって、同一 K_1 値に対して両者間には次式のような簡単な関係のあることが確認される。

$$dl/dN_T = V(N_P)^m \quad (5)$$

ただし、 V 、 m は平滑材と切欠き材で K_1 値によってそれぞれ決定される定数である。

4 き裂進展挙動に関する吟味

疲れき裂の進展は、き裂先端付近で生じる非常に局所化された事象の結果によるものであることは周知のことであり、き裂先端での塑性流動域において、Beardmore と Feltner⁵⁾ の示した図7(a)のような典型的な安定ヒステリシスループを仮定することができる。一般にき裂進展の条件は次式で表示される。

$$\Delta E_p = A_1 \Delta E_e \quad (6)$$

ここで、 ΔE_p はその領域で吸収される塑性エネルギー、 ΔE_e はき裂進展中に解放されるエネルギー、 A_1 は定数である。ここで、き裂が dl だけ進展するとき解放される弾性エネルギーは

$$\Delta E_e = A_2 \sigma_1^2 l dl \quad (7)$$

で与えられる。 σ_1 は公称応力、 l はき裂長さ、 A_2 は定数である。また塑性域面 A_p は、負荷応力及びき裂長さと次のような関係にある。

$$A_p = A_3 \sigma_1^4 l^2 \quad (8)$$

ここに A_3 は定数である。近似的に、全エネルギー ΔE_p は塑性域における代表的な微小領域において吸収される塑性エネルギーに塑性域の体積をかけ合せることにより得られる。

図7(a)に示すようなき裂先端での塑性応力が σ_p となるヒステリシスループを受ける微小領域を考えれば、ループ面積 A_1 は次のように表示できる。

$$A_1 = A_4 \left\{ \frac{\sigma_p - \sigma_i}{\tan E_t} - \frac{\sigma_p - \sigma_i}{\tan E_e} \right\} (\sigma_p + \sigma_i) \quad (9)$$

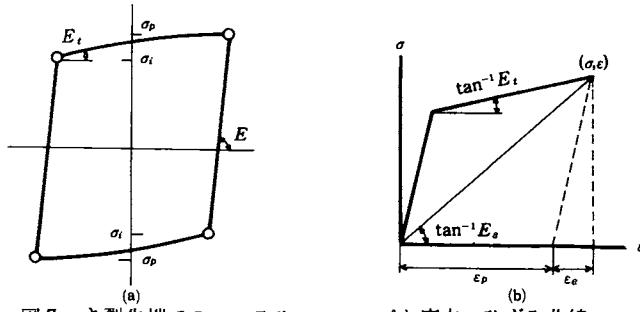


図7 き裂先端でのヒステリシスループと応力一ひずみ曲線

したがって、繰返し数 dN の間に吸収される全エネルギーは、 A_s を定数として

$$\Delta E_p = A_s (\sigma_p^2 - \sigma_i^2) \sigma_1^4 l^2 dN \quad (10)$$

で与えられることになる。よって式(6)より得られるき裂進展に対する条件を用いれば次式が得られる。

$$dl/dN_T = A_s (\sigma_p^2 - \sigma_i^2) \sigma_1^2 l \quad (11)$$

したがって、各予加工材のき裂進展速度は次式で示される進展速度減少係数 R によって比較されることになる。

$$R = \frac{(dl/dN)_{\gamma=0}}{(dl/dN)_{\gamma=\gamma}} = \frac{(\sigma_p^2 - \sigma_s^2)_{\gamma=0}}{(\sigma_p^2 - \sigma_s^2)_{\gamma=\gamma}} \quad (12)$$

ここで、 σ_s は各予加工度での降伏応力、またき裂先端での塑性応力 σ_p は

$$\sigma_p = K_p \sigma_1 \quad (13)$$

で与えられ、一方、塑性応力集中係数 K_p は、セカント係数 E_s とき裂先端半径 ρ により

$$K_p = \sqrt{l/\rho} E_s / E \quad (14)$$

で示されるものである⁶⁾。

しかしながら、き裂先端半径 ρ を測定することは困難であり、ここでは切欠き平板モデルを対象としてき裂先端での塑性応力 σ_p を有限要素法（ユニット分割法）により近似的に求めることにした。すなわち、平板モデルを弾塑性問題として扱い、各要素を降伏させるのに必要な荷重増分を定める山田の方法⁷⁾を用いた。なお、計算における加工硬化係数 H は、単軸引張りの応力一ひずみ曲線を図7(b)に示すように仮定し、接線係数を E_t とすれば

$$E_t = d\sigma/d\varepsilon \quad (15)$$

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p = d\sigma/E + d\sigma/H \quad (16)$$

これより得られる式

$$H = \frac{E E_t}{E - E_t} \quad (17)$$

によるものとした。本場合では、 $E = 2.1 \times 10^4$, $E_t = 476.19$, $H = 487.24 \text{ kgf/mm}^2$ である。

さて、ここで実験および式(12)より得られたき裂進展速度減少係数 R を図8に示した。ここではき裂長さ l としては0.4, 0.5及び0.6mmの3種類、またねじり予加工度 γ としては0.1, 0.2及び0.4とし、各場合の理論値と応力拡大係数より求められる実験値を比較図示した。 R が低い場合では図示のように比較的よい一致を示すが、 R の高い場合、すなわち高予加工度の場合では両者にかなりの差が認められるようである。これは、

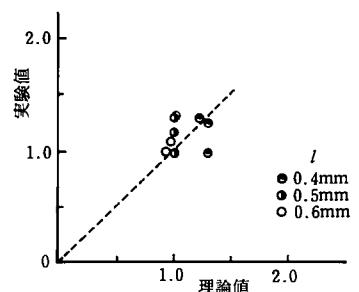


図8 き裂進展速度減少係数の理論値と実験値との比較

き裂先端の塑性応力 σ_p を有限要素法で求める際に、引張りを受ける切欠き平板モデルを対象として近似的に行っていること、及びねじり予加工度の上昇に伴い、降伏応力以外の因子もき裂進展挙動にあづかって影響を及ぼすためと推論される。

5 疲労破壊におけるフラクトグラフィ

電子顕微鏡の観察による破壊の法医学的現象と呼ばれるクラフトグラフィの有用性の大きいことは周知のところであり、特に疲労破壊においては、破面に残されたストライエーションにより、き裂の進展挙動を定量的に評価し得るという利点があり、これに関する研究も多い。^{8) 9) 10)}

本研究においても、本学複合材料応用研究センター設置の走査電子顕微鏡を用いて破面の観察解析を試みたが、材質が軟鋼であり、負荷形式が回転曲げであるため、ここではストライエーションの定量的解析には触れず、関連ある疲労破壊的一般概念と本研究の供試予加工材によって得られた疲労破面の特徴的様相につき論述する。

疲労き裂の挙動は一般にせん断応力によって進展する微視的疲労き裂の進展段階と引張り応力によって進展する巨視的き裂の進展段階、さらに1/4回の応力繰返しによって破壊する最終の静的破壊に大別されるが、その第1段階は、繰返し応力による内部転位の表面付近への集積による突き出しや入り込みの形成、及びそれらがすべり面に沿って内部に入り込む過程であり、そのフラクトグラフィ的特徴は一般には無特徴で、本場合も表面から数10μm程度までは無特徴な領域が存在している。このき裂はやがて破面の応力軸に対する傾きが垂直となる方向、すなわち最大引張応力にほぼ垂直方向に進展を始める第2段階に達する。この段階での最も重要なフラクトグラフィ的特徴は周知のストライエーションであり、もちろん本研究でのいくつかの供試片でこれが明らかに確認された。しかし、破面において局所的にのみしか観察されず、また規則性を欠くことも多かった。破面に及ぼす予加工の影響は、一般に硬い材料におけると同様、加工硬化のためにストライエーションは次第に観察されにくくなり、また高サイクル疲労の場合、その早期にはき裂進展速度が小さいため明りょうなストライエーションは観察されず、いわゆるストライエーション状模様が破面の主要な模様となる場合が

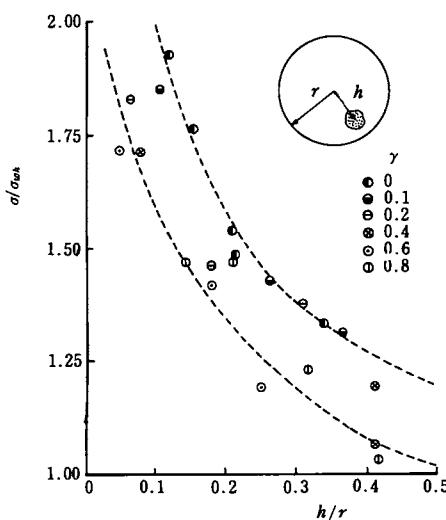


図9 静的破断部位置と繰返し応力レベルの関係

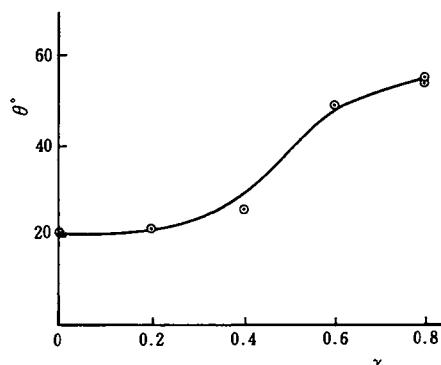


図10 傾斜模様の傾き角と予加工度との関係

多く認められた。この模様は、繰返し塑性変形により形成されるすべり線またはき裂先端付近に形成されるサブグレイン境界などに沿ってき裂が進むため、き裂の進展速度は示さないが、破面が疲労破面であることを確認するための重要な証拠となるものである。また、通例、事故破面判定に有用視される模様のタイヤ・トラックも認められた。さて、次の第3段階は、1/4回の応力繰返しでの静的破壊であり、この破面には一方向応力による破壊の典型的模様として知られているディンプル模様が認められた。なお、この静的破断部の位置は、繰返し応力レベルに依存するものであり、本場合では図9に示す状況となっている。

最後に、ねじり予加工材破面における特異な現象として、直径方向とある傾きをなし、き裂の進展方向を思わせるようなかなりの数のほぼ平行した傾斜模様が周辺から中心部にかけ、特に平滑材の低倍率連続写真において認められたことである。この傾き角 θ は、図10に示すように予加工度 γ によって変化しており、破面観察によって予加工程度を推定する一因子となりうるものと考えられる。

6 結 言

本研究では、S17C相当材の平滑供試片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って疲れき裂の進展挙動を調べ、前報において得られた切欠き材の結果との比較検討を行った。また、き裂先端でのヒステリシスループを考慮することにより得られたき裂進展速度減少係数と実験値との比較も試みた。さらに、走査電子顕微鏡による疲労破面の観察、吟味も実施した。以上の結果より、次の事項が明らかとなった。

- (1) 時間強度に及ぼす予加工効果については、平滑材の場合は $\gamma=0.6$ 程度で、一方、切欠き材の場合は $\gamma=0.4\sim0.5$ において時間強度が最高となる。また、平滑材は切欠き材に比して時間強度の予加工依存性が大きく、 $\gamma=0.25$ 程度以上では、平滑材の方が切欠き材を上回ることが確認された。
- (2) き裂進展速度に及ぼす予加工効果について平滑材と切欠き材を比較すれば、 $\gamma=0.2\sim0.3$ で同一応力拡大係数に対するき裂進展速度の大小関係が逆転していることが確認された。したがって、 $\gamma=0.25$ 程度において平滑材と切欠き材の時間強度が逆転することの根拠の一因子が明らかにされた。
- (3) き裂先端でのヒステリシスループを考慮することにより得られたき裂進展速度減少係数により、切欠き材の $\gamma=0.1\sim0.4$ の場合につき実験値との比較を試みた結果、この程度の低予加工度では比較的良好一致を示した。なお、き裂先端での塑性応力は有限要素法(ユニット分割法)による弾塑性解析により求めた。
- (4) 走査電子顕微鏡による破面観察を行い、疲労破面特有の様相としての第2段階におけるストライエーション、ストライエーション状模様およびタイヤ・トラック、第3段階におけるディンプル、さらにねじりの予加工度をある程度推定しうるねじり予加工材特有の傾斜模様のある破面状況をそれぞれ観察確認した。

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笹岡憲一君に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 柴原・宮崎, 金沢大学工学部紀要, 11—2 (昭53—3), 137.
- 2) Liu, H.W., *Trans. ASME, Ser.D*, 83—1 (1961—3) 23.
- 3) Irwin,G.R., *ASTM STP*. No. 381 (1965).
- 4) Paris,P.C. & Erdogan,F., *Trans. ASME, Ser.D*, 85—4 (1963—12), 528.
- 5) Beardmore, P. & Feltner, C.E., *Inter. Conf. on Fracture*, Paper No. 53 (1969) 607.
- 6) Radhakrishnan,V.M. & Baburamani, P.S., *Materials and Science Engineering*, 17 (1975), 283.
- 7) 山田嘉昭, 塑性・粘弹性, コンピューターによる構造工学講座II—2—A, (昭47), 培風館.
- 8) 中沢・小林, 機械学会誌, 75—642 (昭47—7), 1118.
- 9) 小寺沢, 機械学会440回講習会教材 (昭51—11), 85.
- 10) 小寺沢, 材料, 23—249 (昭49—6), 479.

(昭和54年6月28日受理)