

# 炭素鋼環状切欠き材のねじり疲労に及ぼす組合せ平均応力の影響

宮田, 亮 / MIYATA, Ryo

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

56

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2015-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00011057>

# 炭素鋼環状切欠き材のねじり疲労に及ぼす 組合せ平均応力の影響

## INFLUENCE OF COMBINED MEAN STRESSES ON TORSIONAL FATIGUE OF CARBON STEEL WITH CIRCUMFERENTIAL NOTCHES

宮田 亮

Ryo MIYATA

指導教員 大川 功

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

As a result of torsional fatigue test with static combined tension-torsion loadings in smooth and notch specimen of medium-carbon steel, the more proportion of static tension increased, the more lifetime was reduced. On the other hand, the longest lifetime resulted from application of static torsion. The crack behavior was significantly different depending on the type of static combined loadings. The influence of static loadings on cracking was discussed quantitatively, divided into crack initiation, Mode II and Mode I growth phases. It was found the effect of static loadings on the lifetime can be evaluated, employing an equivalent stress acting on the crack growth planes.

**Key Words** : *Cyclic torsion, Mean stress, Notch effect, Crack growth,*

### 1. 諸言

実機は使用中に繰返し荷重を受けることにより破壊に至る。これらが破壊する原因の大半が疲労によるものであることが分かっている。さらに、実機は応力集中部を有し、負荷されている荷重の種類も一つであることは少なく、実際には曲げ、ねじり、引張りといった動的及び静的な複数の荷重が作用されていることが多い。これらの中でも一般的に繰返しねじりは動力伝達軸に加わる荷重であり、ねじり疲労強度に与える平均応力や応力集中[1-7]、これら力学的因子による影響を考慮した寿命評価[5, 8-10]に関する研究が多く行われてきた。

過去に行われた研究で、引張りの平均応力はねじり疲労強度を低下させるが[1, 2]、逆に、圧縮の平均応力はねじり疲労強度を増加させるという報告がある[3]。また、ねじりの平均応力を付加した場合は、Miller らを[4]例外としてねじり疲労強度にほぼ影響を及ぼさないとしている[5]。程らは[5, 6]異方性のある微視組織を有する中炭素鋼S45Cを用い、両振りねじりに引張りまたはねじりの平均応力を付加して疲労試験を行った結果、初期のき裂は層状組織の影響を強く受け、その後は平均応力の種別に応じてそれぞれ異なるき裂の成長挙動をとると報告している。

寿命の評価に関しては、平均応力が付加された場合、多軸の応力状態を単軸の応力若しくはひずみに等価換算して評価する手法が主に用いられている[8, 9]。また、異なる荷重モードを受ける場合、き裂の進展挙動を詳細に

観察し、き裂の各成長段階に及ぼす平均応力の影響をそれぞれ理解することで、より正確な寿命の評価が可能であるという報告がある[10]。以上のこれまでに行われてきた研究から総括すると、組合せ平均応力だけでなく材料の層状組織による影響も考慮して寿命の評価を行った例は過去に存在しない。

そこで、本研究では層状組織を有する炭素鋼S45Cの平滑材及び切欠き材を用い、繰返しねじり疲労に及ぼす組合せ平均応力の影響とその原因について検討を行った。き裂の発生と成長に及ぼす微視的組織と力学的因子の双方を考慮した定量評価に基づき予測寿命を求め、実際の寿命と比較することで上記原因について考察した。

### 2. 試料及び実験結果

供試材はフェライト/パーライトの層状組織を有する機械構造用炭素鋼S45Cで、試験部の直径が12mmの平滑試験片(SM)、半円切欠き(NA)、及びV型切欠き(NB)に切削後、850℃で1時間保持後炉冷の熱処理を行った。切欠き材のねじりと、引張りにおける軸方向での弾性応力集中係数はそれぞれNAが $K_{zz}=1.130$ と $K_{\theta z}=1.500$ 、NBが $K_{zz}=1.500$ と $K_{\theta z}=2.514$ である。

鷺宮製作所製の電気油圧式サーボ試験機(容量：軸力49kN、ねじり490N・m)を用い室温で疲労試験を行った。負荷条件を表1に示す。 $\tau_a=170\sim 210\text{MPa}$ の両振り繰返しねじりと、静的引張り応力 $\sigma_{eqm}=\sqrt{\sigma_m^2+3\tau_m^2}=180\text{MPa}$ を一定として、これと等価な静的引張りと静的ねじりを

組合せて付加した。静的組合せ応力比は $\lambda = \sigma_m / \sigma_{eqm} = 0$ (ねじり), 0.383, 0.707, 1(引張り)とした。なお、静的引張りのみ $\sigma_m = 100, 180, 210\text{MPa}$ の3種類の応力レベルで疲労試験を行った。き裂の発生と成長挙動の観察にはレプリカ法を用いた。

Table1. Stress condition

	$\sigma_m / \sigma_{eqm}$	$\tau_a (\text{MPa})$	$\sigma_m (\text{MPa})$	$\tau_m (\text{MPa})$
Cyclic torsion	—	170~220	—	—
Cyclic torsion with static tension	1	180~210	100	180
Cyclic torsion	0.707		127	73
with static combined loads	0.383		69	96
Cyclic torsion with static tension	0		0	103

### 3. 実験結果及び考察

#### (1) 疲労寿命特性

図1は繰返しねじり疲労寿命に及ぼす切欠きの影響を示したものである。平滑SMと半円切欠きNAではほぼ同程度の寿命であるのに対し、V型切欠きNBでは平滑材らと比べ明瞭に寿命が減少していることがわかる。これはV型切欠きの応力集中係数値が、平滑材と比べ $K_{zz} = 1.5$ と大きな値となっているためであると考えられる。

図2はねじり疲労寿命に及ぼす静的引張りの影響を示したものである。縦軸は純ねじりに対する寿命比 $N/N_0$ で表示した。また、 $\tau_a = 170, 180, 190, 200, 210\text{MPa}$ における平均値の実線も連ねて示した。

静的引張り応力を付加した場合、切欠きの有無や種別に依らず繰返しねじり疲労寿命は減少した。さらに、各試験片形状共に静的引張り応力レベル及び繰返しねじり応力レベルが増加するにつれてこの傾向はより顕著となった。切欠き材NBのみ、平滑材SM及び切欠き材NAと比較して応力集中係数が $K_{\theta z} = 2.514$ とより高いため、静的引張り応力レベルの比較的小さな $\sigma_m = 100\text{MPa}$ からでも顕著にねじり疲労寿命が減少した。

組合せ静的応力が繰返しねじり疲労寿命に及ぼす影響を図3に示す。縦軸は純ねじりに対する寿命比 $N/N_0$ で、横軸の組合せ応力比 $\lambda$ は、各項に応力集中係数を乗じ $\sigma_{m,notch} = K_{zz}\sigma_m$ 及び $\sigma_{eqm,notch} = \sqrt{(K_{zz}\sigma_m)^2 + 3(K_{\theta z}\tau_m)^2}$ として表示した。また、 $\tau_a = 180, 190, 210\text{MPa}$ における平均値の実線も連ねて示した。

静的引張り( $\lambda = 1$ )を付加した場合、いずれの試験片形状も純ねじりと比べて明瞭に寿命は減少した。組合せ応力比に占めるねじり成分の比率が増大するにつれて純ねじりの疲労寿命に及ぼす影響は減少し、静的ねじり( $\lambda = 0$ )のみを付加した場合では、引張りと同値のねじり応力が付加されているにもかかわらず、平滑材では約60%、切欠き材NAでは約30%寿命が延伸した。

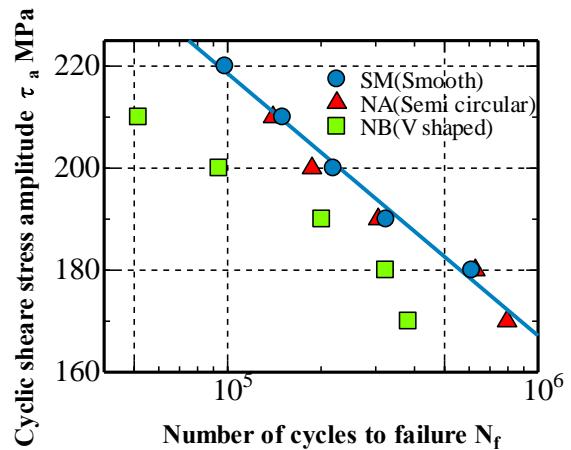


Fig1. Effect of notch on torsional fatigue life

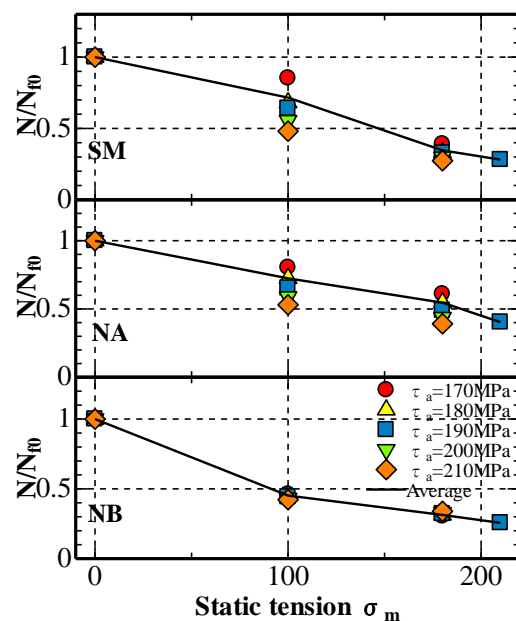


Fig.2 Effect of combined loads on torsional fatigue life

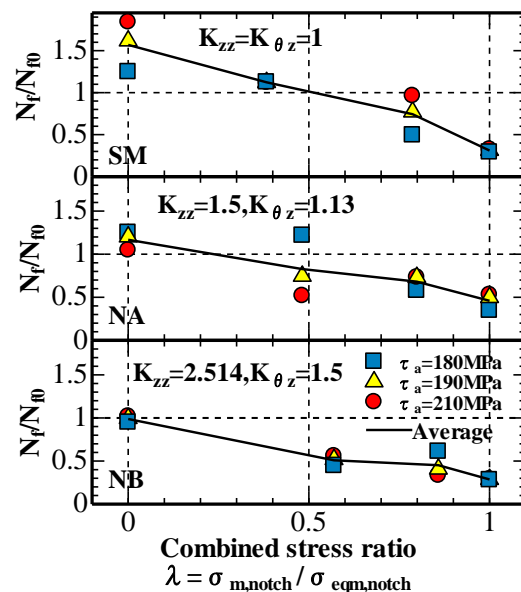


Fig3. Effect of combined loads on torsional fatigue life

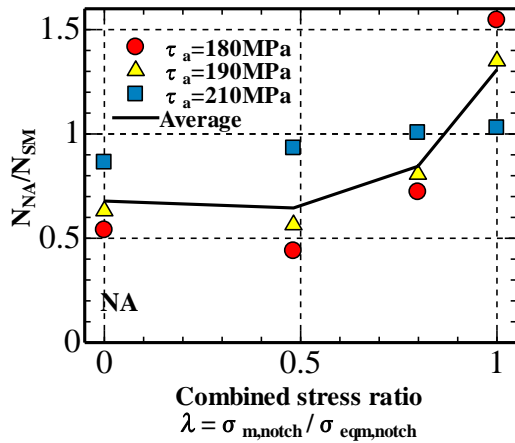


Fig.4. Effect of notch on torsional fatigue life with static combined loads in NA

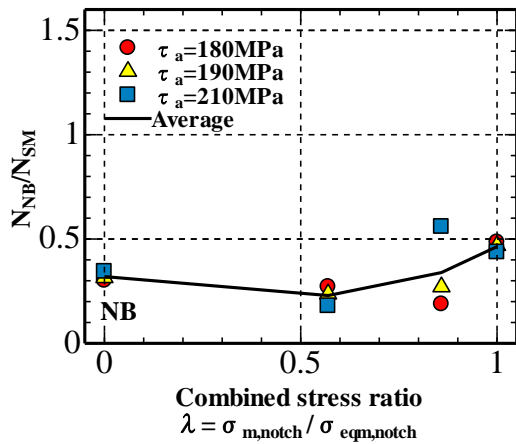


Fig.5. Effect of notch on torsional fatigue life with static combined loads in NB

組合せ静的応力付加時のねじり疲労寿命に及ぼす切欠き材 NA 及び NB の影響をそれぞれ図 4 及び図 5 に示す。縦軸は平滑材での寿命  $N_{SM}$  に対する切欠き材 NA での寿命  $N_{NA}$  及び切欠き材 NB での寿命  $N_{NB}$  の比を用いて表示した。また、 $\tau_a=180, 190, 210\text{MPa}$  での平均値の実線も連ねて示した。

図 4 の切欠き材 NA で静的引張り ( $\lambda=1$ ) を付加した場合、繰返しねじり疲労寿命と比べて 30%程度寿命が減少したが、組合せ応力比  $\lambda$  に占める静的引張り成分の割合が増加するにつれて切欠きが寿命に及ぼす影響は減少する傾向を示し、静的ねじり ( $\lambda=0$ ) のみを付加した場合、逆に 30%程度寿命が延伸し切欠き強化の現象を示した。図 5 の切欠きが鋭く応力集中係数の大きな NB 材の場合、組合せ応力比  $\lambda$  の種別に依らず、いずれの静的応力条件も切欠き弱化的現象を示した。

## (2) き裂進展挙動

### a) 平滑材 SM のき裂進展挙動

図 6 は平滑材 SM のき裂発生分布で、全寿命の約 3 割時点でき裂長さが 0.01mm 以上のものの観察を行った。いず

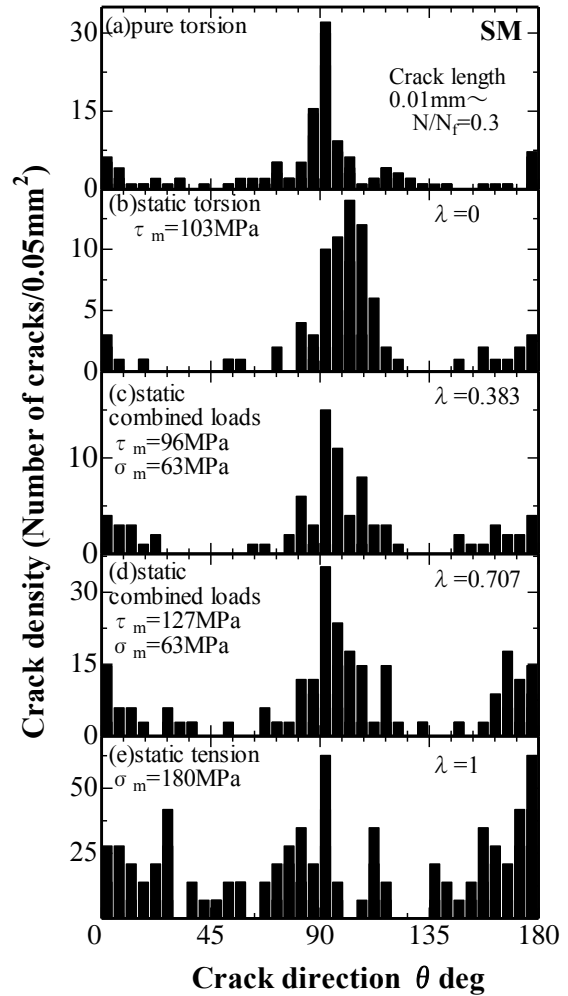


Fig.6 Distribution of microcracks in smooth specimen.

れの組合せ静的応力を付加した場合も層状組織の影響を強く受けて試験片の軸方向 ( $\theta=90^\circ$ ) に多くのき裂が見られることがわかる。組合せの種別で比較すると静的引張りを付加した場合にのみ周方向 ( $\theta=0, 180^\circ$ ) にも軸方向と同程度のき裂の分布が見られた。

図 7 は平滑材 SM の純ねじり及び各静的応力を付加した場合のき裂進展挙動の観察結果を示したものである。繰返しねじり応力  $\tau_a=190\text{MPa}$  の場合についてき裂の観察を行った。

純ねじりの場合、層状組織の影響を大きく受けて試験片軸方向に成長したき裂は主応力面に沿う二方向に分岐して成長し(a), 分岐したき裂同士が合体して巨視的破壊き裂は(b)のようになった。静的ねじり ( $\lambda=0$ ) を付加した場合、軸方向に成長したき裂が、最大主応力面に沿う一方方向のみに伝ばして成長し(c), 巨視的破壊き裂は(d)のようになった。組合せ静的応力を付加した場合 ( $\lambda=0.383, 0.787$ ), 軸方向に成長したき裂はその後、静的ねじりを付加した場合と類似した進展挙動をとり(e), (g), 巨視的破壊き裂も似たような形態となった。静的引張りを負荷した場合は ( $\lambda=1$ ), 周方向に優先的に成長するき裂挙動をとった(i), (j)。

b) 切欠き材のき裂進展挙動

図 8 に切欠き材 NA のき裂進展挙動及び破面の観察結果を示す。純ねじりの場合(a)-(d), 初めは層状組織の影響を受けて軸方向に成長した。その後、分岐したき裂が切欠きの応力勾配により軸方向への成長が阻害され、分岐したき裂どうしが合体したため、亀の甲状の特異な破壊き裂となった。静的ねじり ( $\lambda=0$ ) 及び静的組合せ ( $\lambda=0.383, 0.787$ ) を付加した場合(e)-(p), 共に平滑材 SM の場合と類似した破壊き裂の形態をとった。静的引張り ( $\lambda=1$ ) を付加した場合(q)-(t), 周方向に優勢して成長し、巨視的破壊き裂は比較的平坦となった。破面は静的ねじりを付加した場合が最も凹凸が激しく、き裂面接触の影響も大きくなると考えられる。

図 9 に切欠き材 NB の破壊き裂及び破面の観察結果を示す。切欠きの鋭い NB の場合は純ねじり、静的ねじり及び静的引張りを付加した場合しか観察を行っていないが、いずれの場合も切欠き底に沿う比較的平坦なき裂形態となった。

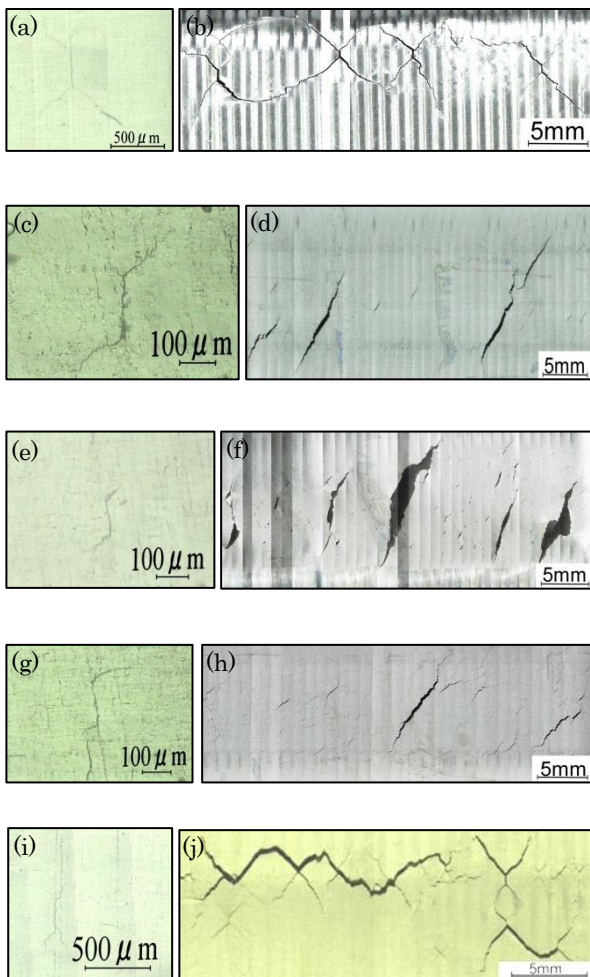


Fig.7 Crack behavior in smooth specimen SM ( $\tau_a=190$  MPa):

- (a), (b) pure torsion, (c), (d) with static torsion ( $\lambda=0$ ),  
 (e), (f) with combined loads ( $\lambda=0.383$ ),  
 (g), (h) with combined loads ( $\lambda=0.707$ ),  
 (i), (j) with static tension ( $\lambda=1$ )

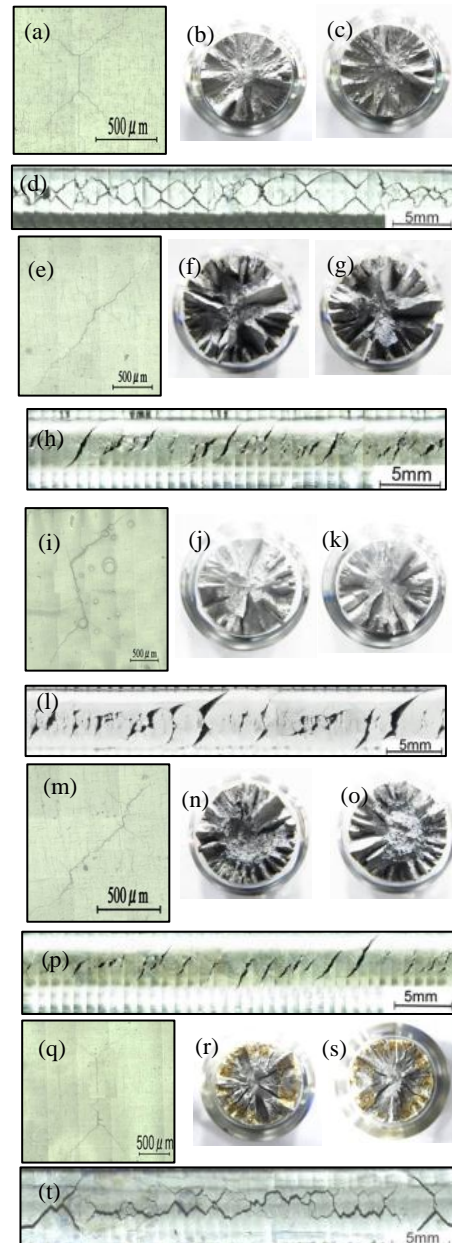


Fig.8 Crack behavior in notch specimen NA ( $\tau_a=190$  MPa):

- (a) - (d) pure torsion, (e) - (h) with static torsion ( $\lambda=0$ ),  
 (i) - (l) with combined loads ( $\lambda=0.383$ ),  
 (m) - (p) with combined loads ( $\lambda=0.707$ ),  
 (q) - (t) with static tension ( $\lambda=1$ )

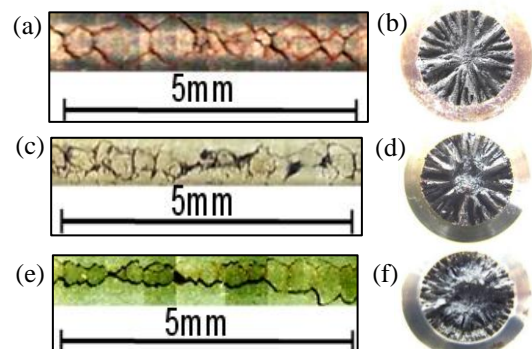


Fig. 9 Failure crack in notched specimen NB ( $\tau_a=190$  MPa):

- (a), (b) pure torsion ; (c), (d) with static torsion ( $\lambda=0$ );  
 (e), (f) with static tension ( $\lambda=1$ ).



(3) き裂発生及び進展挙動に基づく寿命評価

a) き裂の発生段階での定量評価

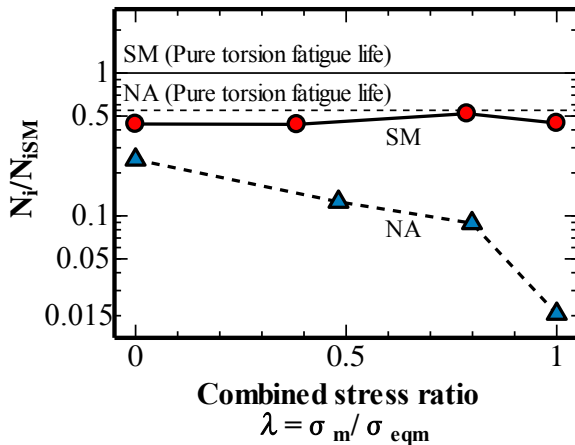


Fig.10 Effect of static combined loads on crack initiation life

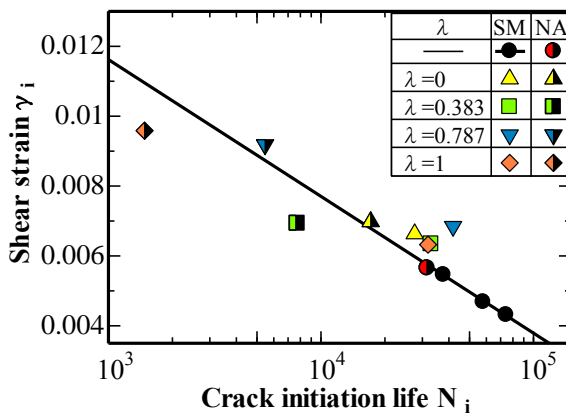


Fig.11 Elasto-plastic shear strain vs. crack initiation life.

組合せ静的応力が繰返しねじりでのき裂の発生時期に及ぼす影響を図 10 に示す。  $\tau_a=190\text{MPa}$  に等価応力  $\sigma_{eqm}=180\text{MPa}$  の組合せ静的応力を付加した条件下でき裂の観察を行い、発生時のき裂長さは  $2c=0.04\text{mm}$  として定義した。縦軸は平滑材 SM の純ねじりでの発生寿命に対する組静的荷重付加時の平滑材 SM 及び切欠き材 NA での発生寿命  $N/N_{ISM}$  を用いて表示した。

組合せ静的応力を付加した場合、平滑材 SM 及び切欠き材 NA のいずれも繰返しねじりのみの場合と比較して早期にき裂が発生していることが分かる。切欠きの有無で比較した場合、平滑材 SM では組合せ静的応力の種別に依らずき裂の発生時期はほぼ一定である。これに対して切欠き材 NA では、静的ねじり組合せ応力比  $\lambda$  に占める静的引張成分が増加するのに応じてき裂の発生時期が早くなっていることが分かる。これは切欠き材 NA におけるねじりの応力集中係数が  $K_{zz}=1.13$  であるのに対して引張りの応力集中係数が  $K_{\theta z}=1.5$  と大きく、より応力

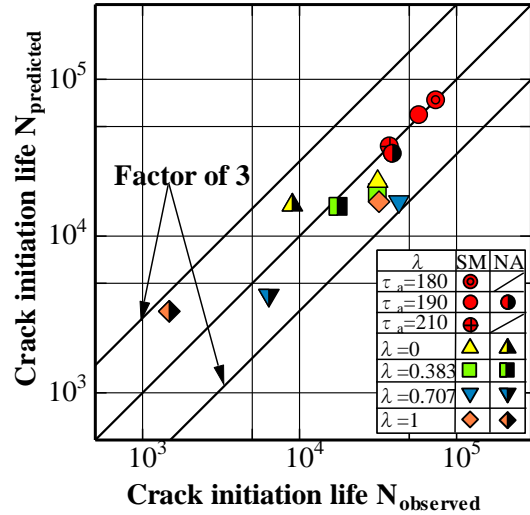


Fig.12 Comparison of observed and predicted initiation lives.

集中の影響を受けたためであると考えられる。

き裂観察を行った結果、き裂の発生は材料の層状組織による影響を大きく受けるため、切欠きの有無や組合せ静的応力の種別に依存せず、試験片の軸方向に沿う最大せん断面付近に主に発生した。き裂はこの最大せん断面上に生じる動的せん断ひずみ及び静的せん断ひずみに支配されると仮定し、き裂発生寿命と弾塑性せん断ひずみ  $\gamma_i = \gamma_a + k_i \sqrt{\gamma_m^2 + \epsilon_m^2 / 3}$  の関係をプロットしたものが図 11 である。

エネルギー密度法[11]により、動的せん断ひずみ  $\gamma_a$ 、静的せん断ひずみ  $\gamma_m$  及び静的垂直ひずみ  $\epsilon_m$  を算出し、組合せ静的応力が純ねじりでのき裂発生寿命に及ぼす影響の程度を  $k_i$  とし、等価せん断ひずみ  $\gamma_i$  として定義した。若干のばらつきはあるものの、このような手法を用いることにより、切欠きの有無や組合せ静的応力の種別に依存せずに、純ねじりでの回帰線上にプロットが近似される。

平滑材 SM の純ねじりでのき裂発生寿命と弾塑性等価せん断ひずみ  $\gamma_i$  と関連付けることにより得られた回帰式を用い、各組合せ静的応力条件についてそれぞれ予測寿命を算出し、実際のき裂発生寿命の試験結果と比較したものが図 12 である。予測寿命と実際の寿命との関係が係数 3 の範囲に入っていることから、切欠きの有無や組合せ静的応力の種別に依らずほぼ寿命を予測できていることが分かる。

b) き裂の成長段階での定量評価

$\tau_a=190\text{MPa}$  に等価応力  $\sigma_{eqm}=180\text{MPa}$  の組合せ静的応力を付加した場合の平滑材 SM 及び切欠き材 NA のき裂進展曲線を図 13(a)及び(b)にそれぞれ示す。き裂が分岐した地点を黒で中塗りして表示した。平滑材に静的ねじり ( $\lambda=0$ ) を付加した場合、純ねじりの場合と比較してき裂の成長が早くなっていることが分かる。静的組合せ ( $\lambda=0.383$ ) を負荷した場合も同様にき裂の成長が早くなって

いることが分かる。静的組合せ( $\lambda=0.787$ )を付加した場合では、純ねじりの場合と比較してき裂の成長は若干遅くなっていることが分かる。静的ねじり( $\lambda=0$ )を付加した場合、き裂の成長は純ねじりよりも大幅に遅くなった。切欠き材NAの場合も平滑材SMの場合程、組合せ静的応力の種別に依る速度差はないが、類似した傾向を示した。

先述のき裂の観察結果から、発生したき裂は層状組織の影響を受けて試験片の軸方向にせん断型モードで成長をした後、最大主応力面上を引張り型のモードで成長する。静的引張りを付加した場合にのみ、初期のき裂は試験片の周方向に引張り型モードで成長する。これらのき裂成長挙動に基づき、せん断型及び引張り型モードのそれぞれの成長段階において各組合せ静的応力条件下でき裂面に加わる応力を繰返し応力と平均応力の線形結合として等価せん断応力 $\tau_{eq}$ 及び等価引張り応力 $\sigma_{eq}$ を表2にそれぞれ定義して示した。 $k_1$ 及び $k_2$ はせん断型及び引張り型の各成長段階で平均応力がき裂の成長に寄与する程度の大きさを表す係数として定義した。

図13のき裂進展曲線から分岐前のせん断型モード及び分岐後の引張り型モードの各段階での成長速度を増分多

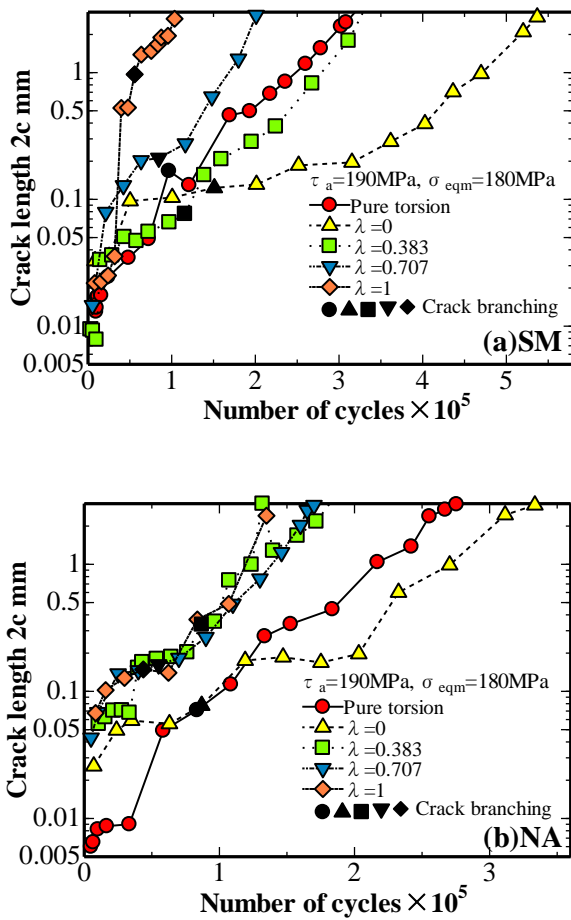


Fig.13 Crack growth curve:  
(a)smooth specimen(SM),  
(b)notch specimen(NA).

項式法により算出して、等価せん断応力 $\tau_{eq}$ と等価引張り応力 $\sigma_{eq}$ と関連付けた結果を図14及び図15にそれぞれ示す。図14及び図15の直線はそれぞれ平滑材SMでの純ねじりでの回帰線である。等価応力に含有される係数は、 $k_1=-0.9$ 及び $k_2=0.3$ とした。図14に示す分岐前のせん断型の成長をする段階では平滑材SM(a)と切欠き材NA(b)の両材共に若干のばらつきはあるものの、等価応力を用いてき裂成長速度を整理することにより、切欠きの有無や組合せ静的応力の種別に依らず平滑材の純ねじりの場合の回帰線にほぼ近似されることが分かる。

Table.2 Equivalent stresses acting on crack planes.

$\lambda$	0	0.383,0.707	1
$\tau_{eq}$	$\tau_a + k_1 \tau_m$	$\tau_a + k_1 \tau_m$	$\tau_a + k_2 \sigma_m$
$\sigma_{eq}$	$\tau_a + k_2 \tau_m$	$\tau_a + k_2 (\tau_m + \sigma_m / 2)$	$\tau_a + k_2 \sigma_m / 2$

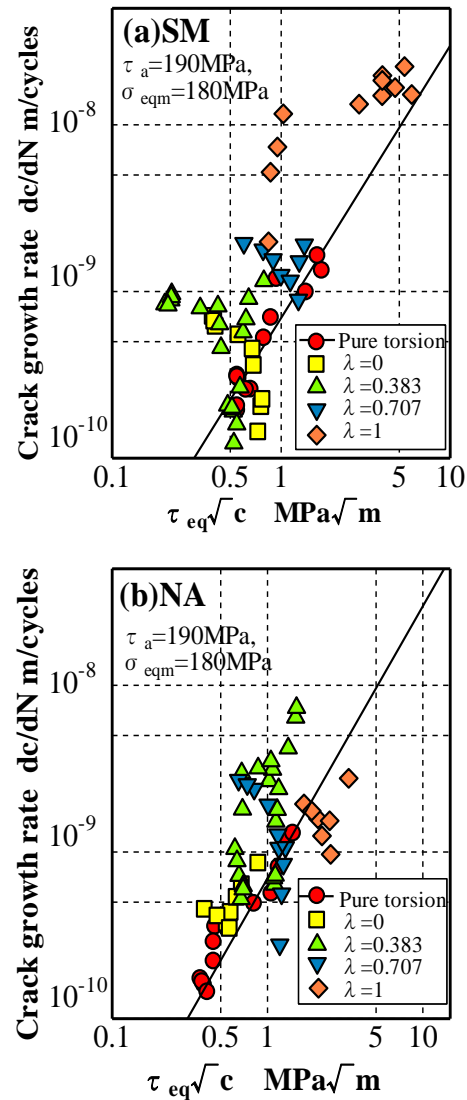


Fig.14 Shear crack growth rate vs. parameter  $\tau_{eq}\sqrt{c}$ :  
(a)smooth specimen(SM),  
(b)notch specimen(NA).

図 15 に示す分岐後の成長をする段階では、平滑材 SM 及び切欠き材 NA の両材共に組合せ静的応力条件ごとに相違するき裂成長速度のばらつきも少なく、等価引張り応力 $\sigma_{eq}$ を用いることにより平滑材 SM の純ねじりの場合の近似線に良く近似されていることが分かる。

せん断型モード及び引張り型モードの各成長段階での平滑材 SM の回帰直線(図 14 及び図 15)の式をそれぞれ積分することにより予測寿命を算出した。初期のせん断型の成長をする段階ではき裂の発生時の長さから分岐時のき裂長さを、その後の引張り型の成長をする段階では、分岐時のき裂長さから破断時のき裂長さまでをそれぞれ積分し、先述の図 11 の平滑材 SM の純ねじりでの回帰式から予測したき裂発生寿命と合算し全寿命の予測を行った。なお、き裂の観察は $\tau_a=190\text{MPa}$  の場合にのみしか行っていないので、 $\tau_a=180\text{MPa}$  及び $\tau_a=210\text{MPa}$  の時の場合も $\tau_a=190\text{MPa}$  と同じ分岐時期であるものとして全寿命の予測を行った。

図 15 に全寿命の予測値と実測値を比較したものを示す。切欠きの有無、組合せ静的応力の種別及び繰返し応力レベルに依存せず、ほぼ寿命を予測できることが分かる。

以上のことから、き裂の発生段階では層状組織による影響を考慮したせん断ひずみ、せん断型モード及び引張り型モードで成長する段階では平均応力による影響を考慮した等価応力を用いることにより、組合せ平均応力の種別により異なるねじり疲労寿命をほぼ定量的に評価できる。

#### 4. 結論

炭素鋼 S45C の平滑材及び切欠き材を用いて、引張りとねじりを組合せた平均応力が繰返しねじり疲労に及ぼす影響について調べた。

組合せ平均応力がねじり疲労寿命に及ぼす影響は付加される組合せの種別により大きく異なる。各組合せ平均応力条件共に、き裂は材料に存在する層状組織の影響を受けるため、試験片軸方向に沿う最大せん断面付近に比較的多く発生した。その後せん断型で成長をし、分岐後は引張り型で成長して破壊に至る。層状組織の影響を受けるき裂の発生とせん断及び引張り型の成長をする各段階に及ぼす平均応力及び応力集中による影響を考慮したせん断ひずみと等価応力を用いることにより、組合せ平均応力の種別により大きく異なるねじり疲労寿命特性をおおよそ定量的に評価できることが明らかとなった。

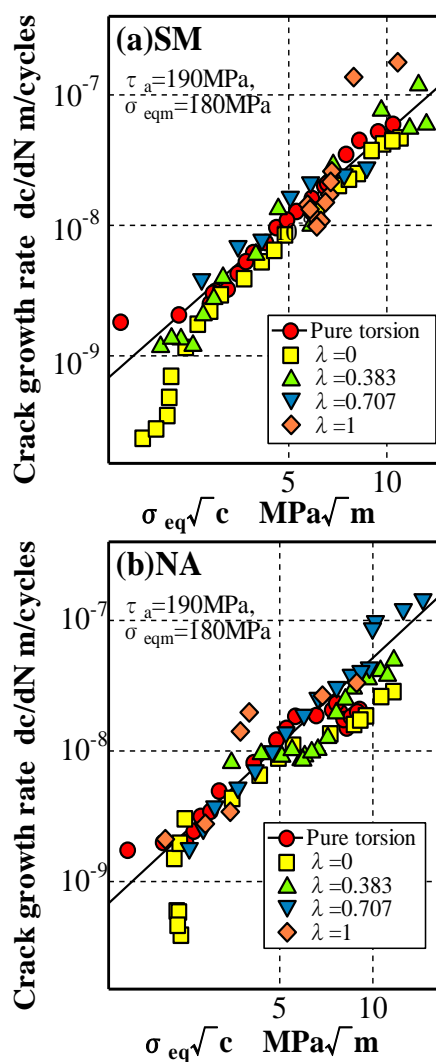


Fig.15 Tensile crack growth rate vs. parameter  $\sigma_{eq}\sqrt{c}$ .

(a)smooth specimen(SM),

(b)notch specimen(NA).

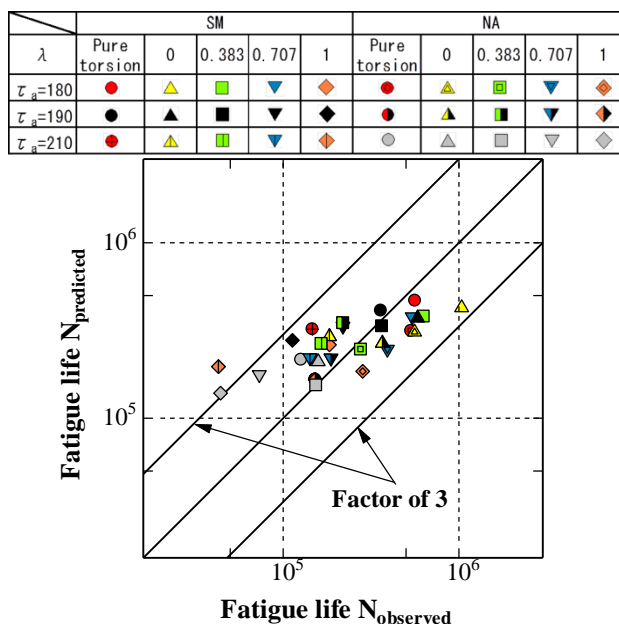


Fig.16 Comparison of observed and predicted lives.



## 参考文献

- 1) 田中 啓介, 石川 知樹, 成田 純一, 江上 登 : 炭素鋼環状切欠き丸棒のねじり疲労寿命, Journal of Society of Materials Science, Japan, Vol. 60 No. 9, pp. 783-789, Sep. 2011
- 2) G. Marquis and D. Socie : Long-life torsion fatigue with normal mean stresses, Engng Mater Struct 23, pp. 283-292, 2000
- 3) Ali Fatemi and Peter Kurath : Multiaxial fatigue life predictions under the influence of mean-stress, Transactions of the ASME, Journal of Engineering and Technology, Vol.110, pp.380-388, 1988
- 4) C. H. Wang and K. J. Miller : The effect of mean shear stress on torsional fatigue behavior, Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. Vol. 14, No 2-3, pp. 293-307, Feb 1991
- 5) 程 序, 大川 功, 三角 正明 : 中炭素鋼のねじり疲労挙動に及ぼす平均応力の影響, J. Soc. Mat Sci., Japan, Vol. 53, No2, pp. 199-206, Feb. 2004
- 6) Xu cheng, I. Ohkawa, M. Misumi : Mean stress effect on cyclic deformation and short crack growth behavior in torsional fatigue of steels, Proceedings of the Seventh International Conference on Biaxial, Mutiaxial Fatigue and Fracture, 2004, Berlin, Germany  
J. Soc. Mat Sci., Japan, Vol. 53, No2, pp. 199-206, Feb. 2004
- 7) Chie Ohkawa, Isao Ohkawa : Notch effect on torsional fatigue of austenitic stainless steel : Comparison with low carbon steel, Engineering Fracture Mechanics 78, pp.1577-1589, 2011
- 8) Goodman, J : Mechanics Applied to Engineering, Longmans, Green and Co., London, pp.455, 189
- 9) Smith, K. N., Watoson, P, and Topper, T.H : A stress-strain function for the fatigue of materials , J mater 5 pp. 767-778, 1970
- 10) W. Zhang and R. Akid : Effect of biaxial mean stress on cyclic stress strain response and behavior of fatigue cracks in a high strength spring steel, Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. Vol. 20, No.20, pp. 167-177, 1997
- 11) Meera N. K. Singh, Grzegorz Glinka, and Rajendra N. Dubey : Notch-tip stresses and strains under nonproportional loading, ASTM STP 1280, pp.131-155, 1997