

炭素鋼環状切欠き材のねじり疲労き裂成長に及ぼす静的組合せ荷重の影響

山下, 大地 / YAMASHITA, Daichi

(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 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

55

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

7

(発行年 / Year)

2014-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00010379>

炭素鋼環状切欠き材の ねじり疲労き裂成長に及ぼす静的組合せ荷重の影響

INFLUENCE OF COMBINED STATIC LOADINGS ON TORSIONAL FATIGUE CRACK GROWTH OF CARBON STEEL WITH CIRCUMFERENTIAL NOTCHES

山下 大地

Daichi YAMASHITA

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

The objective of this study is to investigate effect of static combined tension-torsion loadings on torsional fatigue crack growth of smooth and notched specimens in carbon steel. The influence of static combined loading was clarified based on the results of fatigue test and crack observation. Irrespective of static loading conditions, cracks initiate earlier than in pure torsion. The banded microstructure has significant effect on the crack growth in early stage of life. The crack growth after transition of the growth mode was highly affected by condition of static loads. The shortest lifetime for application of static tension resulted from earlier crack initiation, action of mean tensile stress and easy crack coalescence on macroscopically flat crack plane along the circumferential direction.

Key Words : *Torsional fatigue, Static loadings, Notch effect, Crack,*

1. 緒言

機械構造物は応力集中部を有し、動的及び静的加重が組合わされた多軸応力下で使用されることが多い。その中で繰返しねじりは最も単純な多軸応力状態であり、動力伝達軸においては一般的な負荷形式であることから、その疲労強度に及ぼす応力集中[1,2]や静的荷重の影響[2-9]について多く研究されてきた。

過去の研究から、静的荷重の種別によってねじり疲労寿命に及ぼす影響は大きく異なり、静的なねじり応力は Wang と Miller[7]を例外にして寿命に及ぼす影響はほとんど考慮しなくて良いという報告がなされているが[8]、静的な引張りを付加した場合は純ねじりよりも短寿命となることがわかっている[2-6,8,9]。切欠き材についても同様に、田中ら[1]によると応力集中係数の異なる3つの低炭素鋼環状切欠き材を用いて繰返しねじりとそれに静的な引張りを負荷した条件で中～高サイクル疲労寿命試験を行った結果、短寿命となることが報告されている。また、程ら[8,9]は層状組織を有する中炭素鋼 S45C において、静的なねじり及び引張りの2種類の静的荷重がねじり疲労寿命に及ぼす影響について研究しており、初期せん断き裂は層状組織の影響を受けて成長する傾向があるが、その後は静的荷重の種別に応じたき裂の様相を呈するという報告をしている。しかし程らは、ねじりと引張りの組合せ静的荷重や切欠きを有する場合のねじり疲労

寿命に及ぼす影響やき裂の成長挙動については明らかにしておらず、その影響についても調べた論文はない。

そこで、本研究では組合せ静的荷重がき裂成長挙動及びねじり疲労寿命に及ぼす影響を明らかにするために繰返しねじりに静的な引張り及びねじりの組合せ荷重を付加した条件下において中炭素鋼環状切欠き材を用いて疲労試験を行い、き裂の発生及び成長挙動について詳細に観察した。

2. 供試材及び試験方法

供試材はフェライト/パーライトの層状組織を持つ機械構造用炭素鋼 JIS S45C 丸棒であり、これを平滑材 SM 及び2種類の切欠き材 NA, NB の形状に切削加工した後、850℃で1時間保持後炉冷の熱処理を施した。各試験片の試験部の直径は12mmであり、切欠き材 NA と NB のねじりにおける弾性応力集中係数 $K_{\theta z}$ はそれぞれ 1.130 と 1.500、引張りにおける軸方向の値 K_{zz} は 1.500 と 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)を使用し、室温において荷重制御下で疲労試験を実施した。試験は、両振りの繰返しねじり応力振幅 τ_a が 170~220MPa の純ねじりとこれに静的荷重を付加した条件下で行い、周波数は 0.5~10Hz の範囲内とした。試験条件を Table 1 及び Table 2 に示す。 λ は

静的等価応力に対する静的引張りの応力比である。静的引張りの場合のみ $\sigma_m=100, 180, 210\text{MPa}$ の 3 種類の静的応力で試験を実施した。微小き裂分布と主き裂の成長観察には、レプリカ法を用いた。

Table 1 Condition of cyclic torsion with and without static tension.

| Stress MPa | Cyclic torsion τ_a | Static tension σ_m |
|--|-------------------------|---------------------------|
| Fully-reversed torsion | 170~220 | 0 |
| Fully-reversed torsion with static tension | 170~210MPa | 100, 180, 210 |

Table 2 Condition of static combined loadings.

| Cyclic torsion τ_a MPa | $\sigma_{eqm} = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_m^2} = 180\text{MPa}$ | | |
|--------------------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| | Tension σ_m MPa | Torsion τ_m MPa | σ_m/σ_{eqm} |
| 180~210 | 0 | 103 | 0 |
| | 69 | 96 | 0.383 |
| | 127 | 73 | 0.707 |
| | 180 | 0 | 1 |

3. 実験結果及び考察

(1) 疲労寿命特性

Fig.1 は、純ねじりにおける切欠きの影響を示したものである。応力集中が軽微な切欠き材 NA は、平滑材 SM の寿命とほぼ同等か 90%程度にまで減少するだけである。しかし、ねじりの応力集中係数が 1.500 と大きい切欠き材 NB は平滑材の寿命の 30%程度にまで寿命が減少した。

Fig.2 は各試験片に及ぼす静的引張りの影響を示したものであり、縦軸は純ねじりの寿命 N_0 に対する静的引張りの寿命を用いて表示した。切欠きの有無や応力集中の程度によらず、静的引張り応力が大きくなるほど寿命が減少し、 $\sigma_m=210\text{MPa}$ の時には切欠き材 NA は純ねじりの寿命の 40%にまで減少し、平滑材 SM 及び切欠き材 NB では 25%程度まで減少した。また、切欠き材 NB は引張りの応力集中係数が 2.514 と高いため、 $\sigma_m=100\text{MPa}$ でも明確に寿命が減少した。

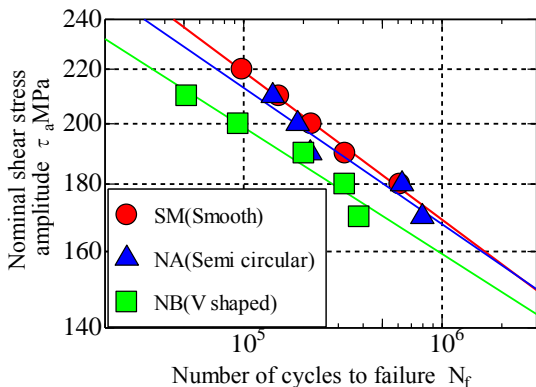


Fig. 1. Notch effect on fatigue life in pure torsion.

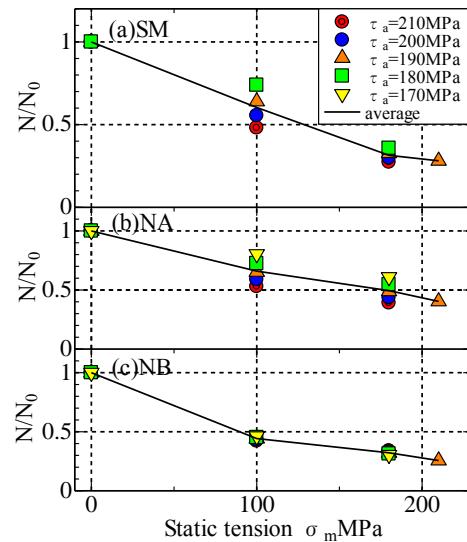


Fig. 2. Effect of static tension on fatigue life.

Fig.3 は静的組合せ応力 $\sigma_{eqm}=180\text{MPa}$ を付加した場合の、ねじり疲労寿命に及ぼす組合せ静的荷重の影響を示したものである。縦軸は純ねじりの寿命 N_0 に対する静的組合せ荷重の寿命を用いて表し、横軸は静的組合せ応力に対する静的引張り応力比で表した。また、切欠き試験片に対しては、応力集中による影響を考慮した組合せ応力比で示した。

静的ねじりを単独で付加した場合($\lambda=0$), 各試験片共に寿命に及ぼす影響はほとんどない。また、平滑材 SM と切欠き材 NA では、逆に純ねじりより 40~60%程度寿命が延伸する傾向を示した。組合せ静的荷重のうち、静的引張りを単独で付加した場合($\lambda=1$)が各試験片とも最も短寿命となり、いずれも純ねじりの 30%程度にまで寿命が減少した。

静的組合せ荷重付加条件下での切欠きの影響を Fig.4 に示す。縦軸は静的組合せ荷重を付加した際の切欠き材の寿命 N_{fs} , N_{fb} に対する平滑材 SM の寿命 N_{fs} を用いて表した。静的ねじりを単独で付加した場合($\lambda=0$), どちらも平滑試験片 SM よりも短寿命となり、切欠き材 NA では平滑材 SM の寿命の約 80%まで減少し、切欠き材 NB では 30%にまで減少した。この減少の程度は、純ねじりの場合の切欠きの影響より若干大きいだけである。

また、静的引張り成分を大きくしても、 $\lambda=0.7$ 付近までは各材とも切欠きの影響はほとんど変化がない。しかし、 $\lambda=0.8$ よりも静的引張り成分が大きくなると各材ともに切欠きの影響が少なくなっていく。

静的引張りを単独で付加した場合($\lambda=1$)が最も切欠きの影響が小さくなり、切欠き材 NB では平滑材 SM の寿命の 50%程度の減少となる。また、切欠き材 NA では切欠き強化の現象を示し、平滑材 SM の寿命より 30%程度長寿命となった。

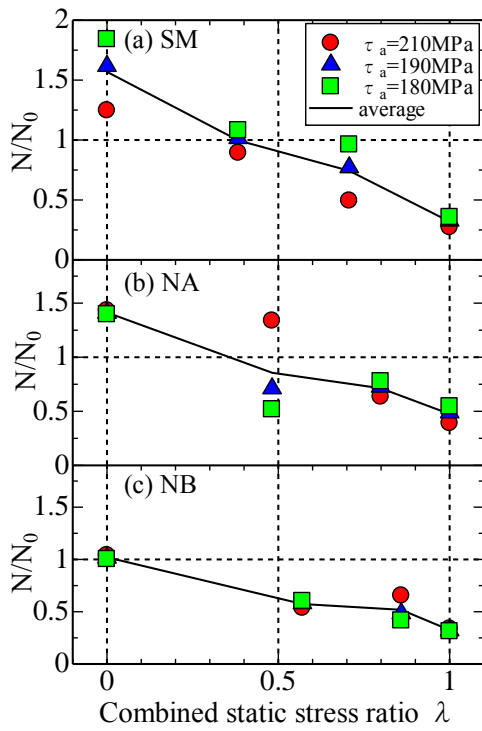


Fig. 3. Effect of combined static loadings on fatigue life.

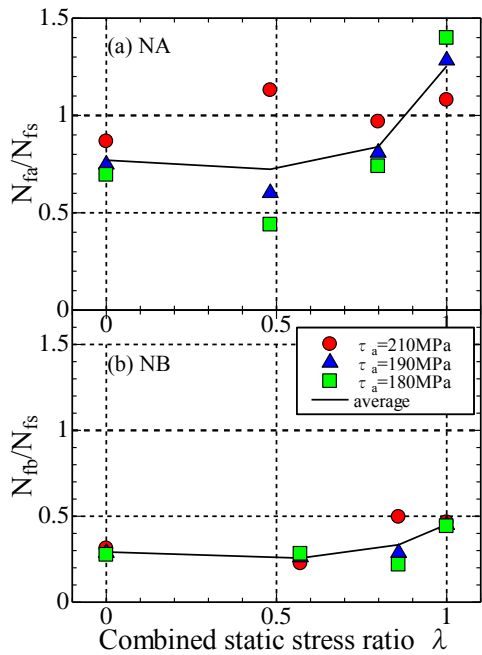


Fig. 4. Dependence of notch effect on combined stress ratio.

(2) 疲労き裂の成長挙動

a) 平滑材のき裂成長挙動

平滑材のき裂の成長挙動を Fig. 5, Fig. 6 に示す。 N_f/N_f は成長モード遷移時の繰返し数比、 l_1 は遷移時のせん断長さである。 Fig. 5 は平滑材の繰返し数比 $N/N_f \approx 0.3$ における微小き裂の分布である。縦軸にき裂密度、横軸にき裂角度を示しており、試験片の周方向を $\theta = 0^\circ$ としている。純ねじりの場合、軸方向 ($\theta = 90^\circ$) に沿う層状組織の影響を受けて長さ 0.03mm 以上の多くのき裂が軸方向

の近傍に発生した。静的ねじり ($\lambda=0$) 及び 2 種類の静的組合せ荷重 ($\lambda=0.383, 0.707$) の場合、微小き裂は軸方向近傍に優先して発生したが、純ねじりと比較して 0.01mm 程度の短いき裂の割合が大きくなる傾向を示した。一方、静的引張りを付加した場合 ($\lambda=1$)、微小き裂は軸方向のみならず周方向にも 0.03mm 以上のき裂が多く発生した。その後のき裂の成長挙動は、純ねじりの場合、軸方向に成長したせん断型き裂は Fig. 6.(a) に示すように 2 つの主応力面上に伝ばし、(b) に示す巨視的破壊き裂を形成した。静的ねじりを付加した場合 ($\lambda=0$)、軸方向に成長したせん断型き裂は (c) に示すように最大主応力面に沿って方向を変えて伝ばし、(d) に示す巨視的破壊き裂を形成した。(e)-(h) に示す 2 種類の静的組合せ荷重の場合 ($\lambda=0.383, 0.707$) のき裂成長挙動は静的ねじり負荷の場合と類似している。静的引張りを付加した場合 ($\lambda=1$) は、(i) に示すように軸方向のせん断型き裂が優先的に成長し、その後、最大引張り応力が作用する面に沿って成長し、(j) に示す巨視的破壊き裂を形成した。き裂成長モードの遷移時期 N_t/N_f は純ねじりの場合は寿命の約 35% の時であり、静的ねじりのみを付加した場合と静的組合せ応力 ($\lambda=0.383$) を付加した場合もほぼ一緒であった。しかし、静的組合せ応力 ($\lambda=0.707$) 及び静的引張りを付加した場合の遷移時期 N_t/N_f は寿命の約 55% の時であった。このことから組合せ静的応力に占める静的引張り成分がある程度大きくなると、

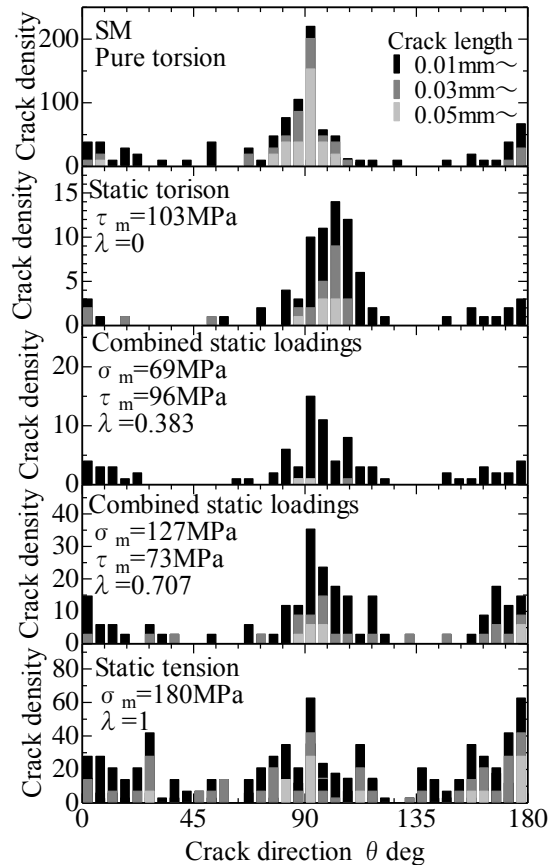


Fig. 5. Distribution of microcracks in smooth specimen.

モードⅡが寿命に占める割合が多くなる傾向を示すことがわかる。また、モード遷移時のき裂長さ l_t は静的ねじりを付加すると純ねじりの場合よりも短くなるが、静的引張りを付加した場合は、長いせん断型き裂が成長することが認められた。

b) 切欠き材のき裂成長挙動

Fig. 7 に切欠き材 NA のき裂成長挙動を示す。(a)-(d) に示す純ねじりの場合、層状組織の影響を受けて微小き裂は主として軸方向に成長する。切欠きにより軸方向への成長が阻害されるためき裂は分岐後合体し、このため亀の甲状の特徴的な破壊き裂が周方向に沿って形成された。破断面もジグザグしているため、き裂面接触の影響が大きいと考えられる。(e)-(h)の静的ねじりを付加した場合($\lambda=0$)及び、(i)-(l),(m)-(p)の2種類の静的組合せ荷重を加えた場合($\lambda=0.383, 0.707$)のき裂成長挙動は、Fig. 6 の平

滑材の場合とよく似ている。微小き裂は軸方向のみならず、周方向にも発生したが、層状組織によって周方向には成長できず、軸方向に成長した。これらの場合成長モード遷移後のき裂は最大引張り応力面に沿ってのみ成長するので、(h),(l),(p)に見られるようにき裂同士は合体は

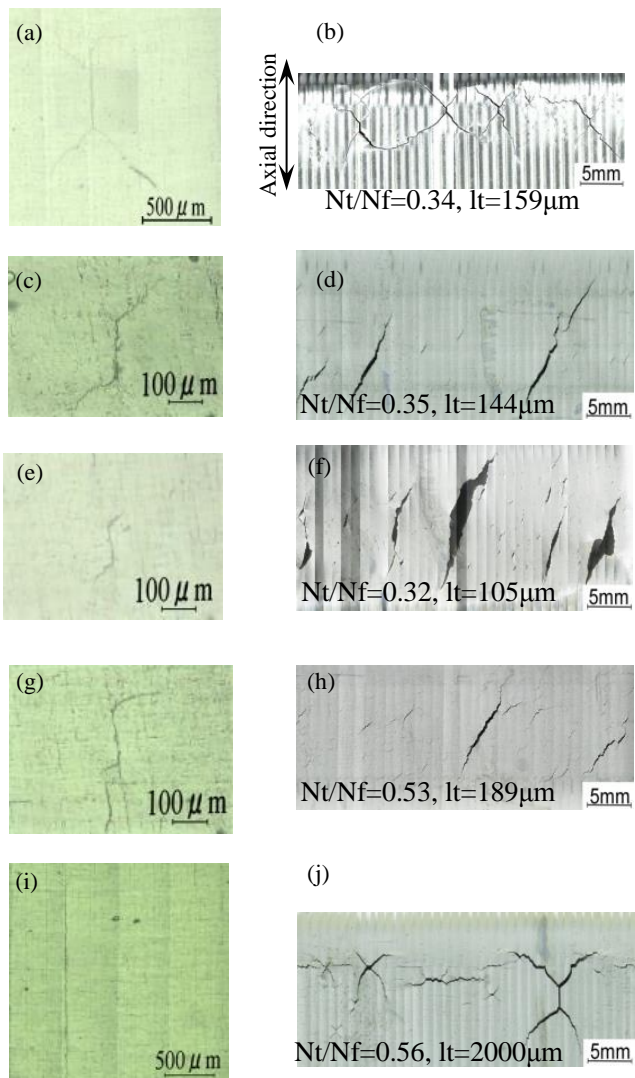


Fig. 6. Crack growth in smooth specimen ($\tau_a=190$ MPa):

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

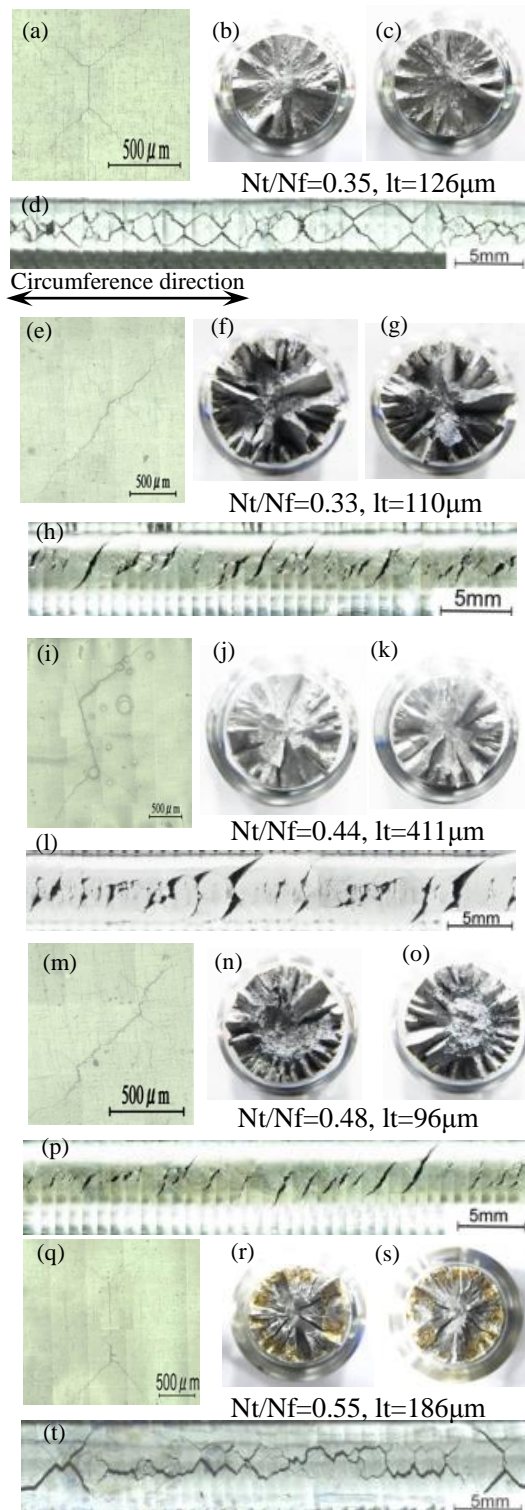


Fig. 7. Crack growth in notched specimen NA ($\tau_a=190$ MPa):

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

見られない。(q)-(t)の静的引張りを付加した場合は、他の負荷条件の場合と同様、軸方向へのき裂成長が優勢であるが、分岐後のき裂は静的引張りが作用する面に沿って伝ば、合体し、比較的平坦な破壊き裂が形成された。き裂成長モードの遷移時期 N_u/N_f は、純ねじりの場合寿命の約 35%の時点であり、平滑材の場合と同様である。他の負荷条件でも平滑材と同様の傾向を示し、静的応力に占める静的引張り成分がある程度大きくなると、モードIIが寿命に占める割合が大きくなる傾向を示した。モード遷移時のき裂長さ l_t についても同様に、静的ねじりを付加すると純ねじりの場合よりも短くなるが、静的引張りを付加した場合は純ねじりよりも長くなる。

Fig. 8は切欠きの鋭い切欠き材NBの巨視的破壊き裂及び破断面を示したものである。純ねじりの場合、(a)に示すように切欠き材 NA と類似した巨視的破壊き裂を形成した。破断面は切欠き材 NA と比較したら試験片軸方向における応力勾配が大きくなるため、凹凸の程度は小さいものの、依然として凹凸が存在する。静的ねじりを単独で付加した場合($\lambda=0$), (c)に示すように隣り合うき裂の合体が認められ、切欠き材 NA とは異なる傾向を示した。しかし、破断面は依然として凹凸がある。一方、静的引張りを単独で付加した場合($\lambda=1$), 他の負荷形態と比較してかなり凹凸が小さくなった。

c) き裂成長挙動に及ぼす切欠きの影響

初期せん断型き裂は、切欠きの有無にかかわらず層状組織の影響を受けて試験片軸方向に成長し、その後の成長は、静的応力の種別によって異なる形態をとる。純ねじりの場合にのみ、軸方向に応力勾配が存在するために亀の甲状の特異な破壊き裂形態をとる。また、種々の組合せ静的応力を付加した場合のモードの遷移時期や巨視的破壊き裂の形態は平滑材 SM と大差はなかった。しかし、静的引張りを単独で付加した場合にのみき裂の遷移長さが平滑材 SM よりも大幅に短くなった。切欠き材 NB

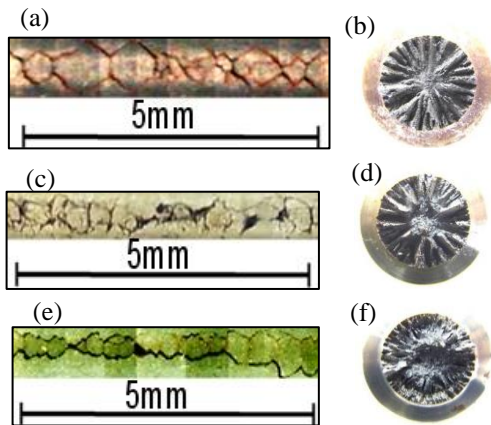


Fig. 8. Macroscopic failure crack in notched specimen NB ($\tau_a=190$ MPa):

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

については、巨視的破壊き裂のみの比較であるが、各負荷条件ともに破面の凹凸が小さくなり、切欠き材 NA と比較してき裂面接触の影響が小さくなると考えられる。

d) き裂成長曲線

平滑材 SM 及び切欠き材 NA のき裂成長挙動を Fig. 9 に示す。図中の黒く塗りつぶしたマーキングはモードの遷移時期を表している。平滑材 SM 及び切欠き材 NA の双方とも、静的ねじりを付加した場合のき裂成長は純ねじりよりも遅くなる。また、組合せ静的応力では、静的引張り成分が大きくなるにつれてき裂成長は速くなる傾向を示し、切欠き材 NA は引張り成分がより小さい値からでも明確にき裂成長は速くなった。静的組合せ荷重のうち、各材ともに静的引張りを単独で付加した場合がもっともき裂成長が速くなる。このき裂成長挙動の相違は Fig. 3 に示した寿命に及ぼす静的負荷の影響と符号している。

e) き裂発生時期

き裂の発生を $2c=0.05$ mm と定義した時の平滑材 SM 及び切欠き材 NA のき裂発生寿命を Fig. 10 に示す。縦軸は平滑材の純ねじりでのき裂発生寿命 $N_{i,sm0}$ に対する平滑材 SM 及び切欠き材 NA の組合せ静的荷重下でのき裂発生寿命で表した。また、平滑材 SM の純ねじりでの発生寿命に対する切欠き材 NA の純ねじりでの発生寿命は破線で表示した。各材ともに、静的荷重を付加した場合、いずれの静的荷重も純ねじりより大幅に発生が早くなった。また、この傾向は切欠き材 NA の方が強くなる。

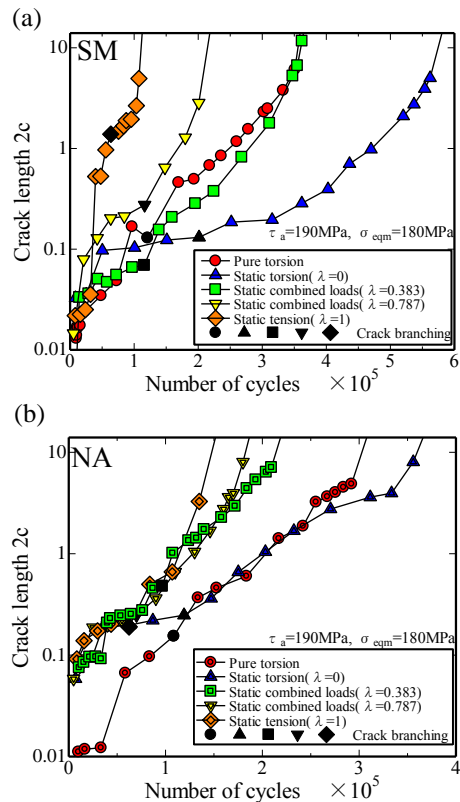


Fig. 9. Crack growth curves : (a) smooth specimen SM;(b) notched specimen NA.

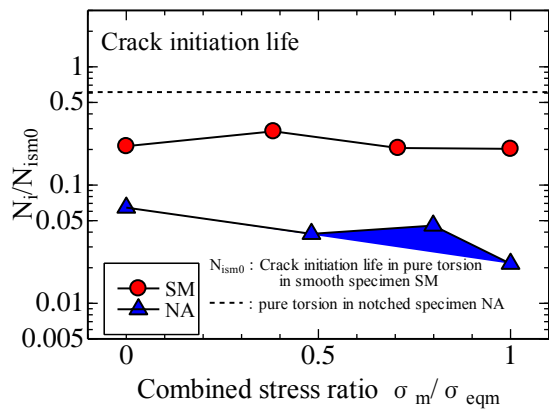


Fig. 10. Crack initiation life in Combined stress ratio.

f) モードII成長におけるき裂成長速度

Fig. 11 に平滑材 SM 及び切欠き材 NA のモードII成長におけるき裂成長速度を示す。モードII成長時期では、各材ともにき裂成長速度にばらつきはあるものの、組合せ静的応力の静的ねじり成分が多くなるほどき裂成長速度が遅くなる傾向を示した。純ねじりでは切欠き材 NA と平滑材 SM のき裂成長速度は大差ないものの、静的ねじり成分が含まれる静的組合せ荷重を付加した条件では、平滑材 SM よりもき裂成長速度が速くなる傾向を示した。また、平滑材 SM に静的引張りを単独で付加した場合のみき裂成長速度にばらつきはなく、大幅に速くなったが、切欠き材 NA に静的引張りを単独で付加した場合には軸方向に成長した微小き裂が応力勾配によって成長が妨げられるために、他の負荷形態と大差がなかった。

g) モードI成長におけるき裂成長速度

Fig. 12 に平滑材 SM 及び切欠き材 NA のモードI成長におけるき裂成長速度を示す。平滑材 SM のき裂成長速度—き裂長さ関係に対する近似線を実線で表し、切欠き材 NA の近似線は破線で表示した。モードII成長時期とは異なり、モードI成長時期では切欠きの有無にかかわ

らず、いずれの負荷条件も、き裂長さが長くなるほどき裂成長速度が速くなる。平滑材 SM の場合、静的ねじりを単独で付加してもき裂成長速度は純ねじりと大差はないが、静的引張り成分が大きくなるほどき裂成長速度は速くなる。切欠き材 NA の場合は、静的ねじりを単独で付加した場合にはき裂長さが長くなるほど純ねじりよりもき裂成長速度は遅くなる。これは、純ねじりの破面よりも静的ねじりを付加した場合の破面の方が凹凸が激しかったことから、き裂長さが長くなるほどき裂面接触の影響が大きくなったためだと考えられる。切欠き材 NA の場合も静的引張り成分が大きくなるほどき裂成長速度が速くなる。

平滑材 SM と切欠き材 NA を比較すると、各静的組合せ応力条件ともき裂成長速度に大差はなかったが、静的引張りを単独で付加した場合のみ切欠き材 NA の方が平滑材 SM よりもき裂成長速度が速くなった。

(3)ねじり疲労き裂成長に及ぼす組合せ静的荷重の影響

平滑材 SM 及び切欠き材 NA に等価応力が等しい組合せ静的荷重を付加した結果、その組合せ応力比の相違によりねじり疲労挙動は大きく異なることがわかった。

上記で述べたき裂の観察結果から、静的引張りを単独で付加した場合が最も短寿命となったのはき裂の発生が純ねじりよりも大幅に早く、モードII成長のき裂成長速度も平滑材 SM では明確に速くなり、各材ともにモードI成長のき裂成長速度が速くなったからであると考えられる。また、巨視的には平坦なき裂経路をとるためき裂面接触の影響が軽減したことも要因の一つだと考えられる。また、静的ねじりを単独で付加した場合にはき裂の発生は純ねじりよりも大幅に早くなるものの、モードIIのき裂の成長速度は純ねじりよりも遅くなる傾向を示し、成長モードが遷移後の成長速度においても平滑材 SM は純ねじりと同等であり、切欠き材 NA はき裂面接触の影響が大きいので成長速度が遅いため、各材ともに純ねじ

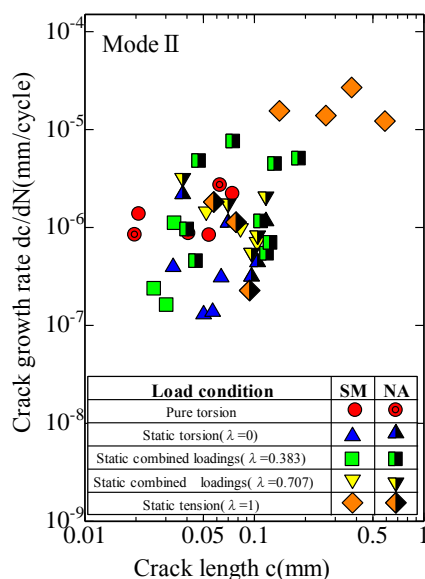


Fig. 11. Crack growth rate in mode II.

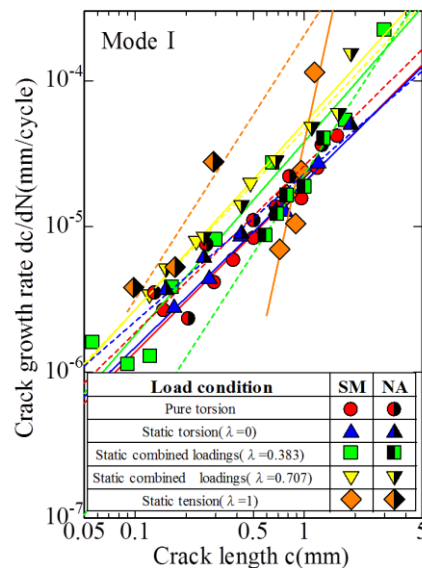


Fig. 12. Crack growth rate in mode I.

りよりも長寿命になったと考えられる。また切欠き材 NB は、各付加条件ともに破面の凹凸が小さいことから、静的ねじりを付加した場合もき裂面接触の影響が切欠き材 NA よりも小さいので、純ねじりより寿命が延伸しなかったと考えられる。

(4) 組合せ静的荷重を付加した条件下でのねじり疲労き裂成長に及ぼす切欠きの影響

平滑材及び切欠き材を用いて、繰返しねじりに等価応力が等しい組合せ静的荷重を付加した条件で行なった試験結果から、組合せ応力比の相違により、ねじり疲労き裂成長に及ぼす切欠きの影響が異なることがわかった。上記で述べたき裂の観察結果から、静的ねじりを単独で付加した場合に切欠き強化となったのは、き裂成長モード遷移後のき裂成長速度は大差がないものの、き裂の発生及びせん断型き裂成長速度が速いためだと考えられる。また、静的引張りを付加した場合に切欠き強化となったのは、き裂の発生及び、成長モード遷移後のき裂成長速度が速いものの、せん断型き裂が応力勾配の影響によって遅くなったためだと考えられる。

4. 結論

中炭素鋼の平滑材及び環状切欠き材を用いて繰返しねじりに静的組合せ荷重を付加した条件下で疲労試験を行い、ねじり疲労き裂成長に及ぼす静的組合せ荷重の影響を調べた。

静的荷重を付加すると、き裂の発生は純ねじりよりも大幅に早くなるが、その後の成長挙動の違いによってねじり疲労寿命に大きな違いが現れた。静的引張りを付加した場合は、き裂の成長速度も速く、巨視的には平坦なき裂がき裂面接触の影響を減少させたので最も短寿命となったと考えられる。また、静的ねじりを付加した場合には各成長モードでの成長速度が遅く、一方向に成長したき裂がき裂面接触の影響を大きくしたため寿命が延伸したと考えられる。また、静的引張りを付加した場合にのみ切欠き強化となったのは、軸方向に存在する応力勾配のためにせん断型き裂の成長が平滑材よりも遅くなったためだと考えられる。

参考文献

- 1) 田中啓介, 石川知樹, 成田純一, 江上登: 炭素鋼の環状切欠き丸棒のねじり疲労寿命, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 60, No. 9, pp. 783-789, Sep. 2011
- 2) 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
- 3) Findley, W. N.: A theory for the effect of mean stress on fatigue of metals under combined torsion and axial load or bending, Journal of Engineering for Industry, pp. 301-306, 1959
- 4) W. Zhang, R. Akid: Mechanisms and fatigue performance of two steels in cyclic torsion with axial static tension / compression, Fatigue Fract. Engng Mater. Struct, Vol. 20, No. 4, pp. 547-557, 1997
- 5) W. Zhang, R. Akid: Effect of biaxial mean stress on cyclic stress-strain response and behavior of short fatigue cracks in a high strength spring steel, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct, Vol. 20, No. 2, pp. 167-177, 1997
- 6) D.F. Socie, T.W. Shield: Mean stress effect in biaxial fatigue Inconel 718, Transaction of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 106, No. 10, pp. 227-232, 1988
- 7) C. H. Wang, K. J. Miller: The Effect of Mean Shear Stress on Torsional Fatigue Behaviour, Fatigue Fract. Engng Master. Struct. Vol. 14. No. 2/3, pp. 293-307, 1991, Printed in Great Britain
- 8) 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, No. 2, pp. 199-206, Feb. 2004
- 9) 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