

# 525 引張・圧縮および繰返しねじり条件下での改良 9Cr 鋼の き裂伝ばに及ぼすひずみ波形の影響

The Influence of Strain Waveform on Crack Propagation of Mod.9Cr-1Mo Steel under Push-Pull and Reversed Torsion

○正 西野 精一 (富山大)

萩原 衛 (富山大院)

正 塩澤 和章 (富山大)

Seichi NISHINO, Kazuaki SHIOZAWA, Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555

Mamoru HAGIWARA, Graduate Student of Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555

**Key Words:** Crack Propagation, Strain Waveform, Elevated Temperature, J-Integral, Push-Pull, Reversed Torsion

## 1. 緒言

改良 9Cr-1Mo 鋼は高温強度特性に優れたフェライト系耐熱鋼として利用されており、本材の高温低サイクル疲労強度に関する一連の研究により、クリープを伴う低サイクル疲労条件下で引張りひずみ保持よりも圧縮ひずみ保持条件で短寿命になることが知られている<sup>(1)</sup>。これら負荷ひずみ波形が疲労寿命に及ぼす影響の主因としては、保持期間中のクリープ及び平均応力の影響が報告されている<sup>(2)</sup>が、それらがき裂伝ばに及ぼす影響については必ずしも明確とはなっていない。また、実機部材に作用する応力・ひずみ状態は単軸の引張・圧縮条件だけではなく、繰返しねじり等複雑な応力条件にさらされている場合が多いにもかかわらず研究例は少ない。

本研究では、改良 9Cr-1Mo 鋼の引張・圧縮および繰返しねじり条件下でのき裂伝ば速度に及ぼすひずみ波形の影響を明らかにすることを目的に、三角波およびひずみ保持台形波を用いた高温低サイクル疲労試験を行った。

## 2. 供試材および実験方法

**2.1 供試材** 本実験で用いた供試材は改良 9Cr-1Mo 鋼であり、その化学成分を表 1 に示す。試験片は外径 12mm、内径 9mm、平行部長さ 10mm の薄肉中空円筒試験片に機械加工後試験片外面及び内面を 2000 番までのエメリー紙で研磨後、試験片標点部中央に放電加工により直径 0.3mm の切欠き円孔を設けて試験に供した。

**2.2 実験方法** 実験には電気炉付き電気・油圧サーボ疲労試験機を用いた。試験温度は 873K とし、ひずみ速度 0.1%/s の下、引張・圧縮負荷と繰返しねじり負荷低サイクル疲労試験を行った。負荷ひずみ波形は三角波(PP 波)とひずみ保持を伴う台形波とし、引張・圧縮負荷の場合、圧縮で保持を伴う台形波(CH 波)と引張り側で保持を伴う台形波(TH 波)で行った。

き裂長さの測定には直流電位差法を用いた。直流電位差法では試験片に 20A の一定電流を通電し、切欠き円孔をはさんだ 4mm の間隔にスポット溶接した直径 0.4mm の白金線によ

り測定した電位差からき裂長さを測定した。

## 3. 実験結果および考察

**3.1 疲労き裂伝ば試験結果** 各疲労試験で得られたき裂伝ば速度を繰返し J 積分範囲  $\Delta J$  で整理した結果を図 1 に示す。ここで、 $\Delta J_f$  は疲労 J 積分範囲  $\Delta J_f$  とクリープ J 積分範囲  $\Delta J_c$  の和として求めた。なお、 $\Delta J_f$  および  $\Delta J_c$  は次式より算出した。

$$\Delta J_f = \frac{\Delta K}{E} + \frac{S_f}{2Bb} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta J_c = \frac{n-1}{n+1} \cdot \frac{S_c}{2Bb} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\Delta K$  は応力拡大係数範囲、 $E$  は 873K での弾性率、 $n$  はクリープ指数、 $S_f$  は負荷過程中的荷重一変位曲線から求めた面積、 $S_c$  はひずみ保持期間中の荷重一変位曲線より求めた面積、 $B$  は板厚、 $b$  はリガメント長さである。図より、引張・圧縮負荷の場合引張り保持台形波、圧縮保持台形波とも保持時間の増加に伴いき裂伝ば速度の加速が認められるが、繰返しねじり負荷の場合、保持時間の増加に伴うき裂伝ば速度の変化はあまり認められない。

図 2 に同一の  $\Delta J$  における台形波のき裂伝ば速度と三角波のそれとの比  $((d2a/dN)/(d2a/dN)_{pp})$  と保持時間との関係を示す。図より引張・圧縮負荷の場合、保持時間の増加に伴いき裂伝ば速度が単調に増加しているが、繰返しねじり負荷では保持時間の増加に伴うき裂伝ば速度の顕著な変化は認められない。また、引張・圧縮条件下での保持時間の増加に伴うき裂伝ば速度の増加は引張り保持台形波よりも圧縮保持台形波の方が大きいことがわかる。

各台形波の疲労過程ではひずみ波形の非対称性により保持側と逆側の応力振幅が増加し平均応力を生じる。図 3 に寿命の 1/2 の繰返し数における最大応力  $\sigma_{max}$  と最小応力  $\sigma_{min}$  を平均して求めた平均応力  $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$  と保持時間との関係を示す。なお、図中の繰返しねじり負荷の場合の平均応力は相当応力で示した。図より、何れの負荷条件下でも平均応力の絶対値は保持時間の増加に伴い増加しており、その大きさは負荷条件によらずほぼ同程度であることがわかる。

Table 1 Chemical compositions of mod.9Cr-1Mo steel (wt. %).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	N
0.09	0.32	0.39	0.009	0.006	0.06	0.09	8.76	0.95	0.2	0.076	0.046

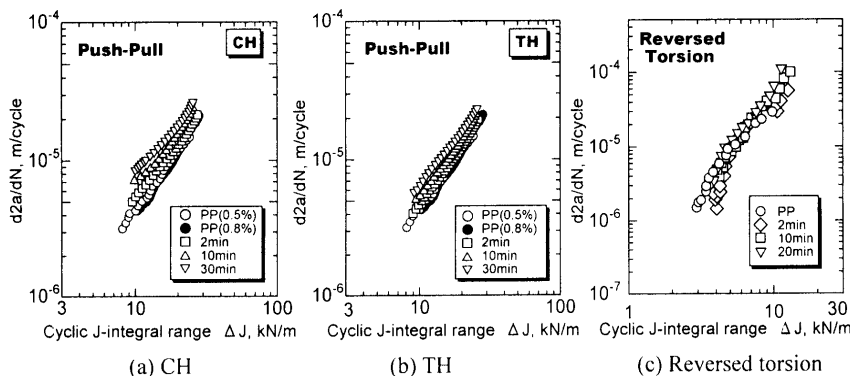


Fig.1 Relationship between crack propagation rate and cyclic J-integral range.

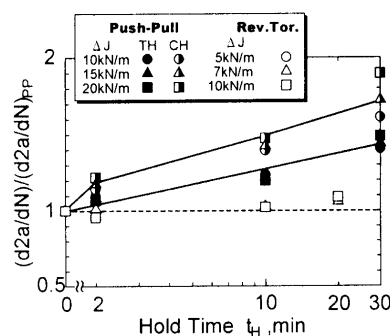


Fig.2 Relationship between crack propagation rate and hold time.

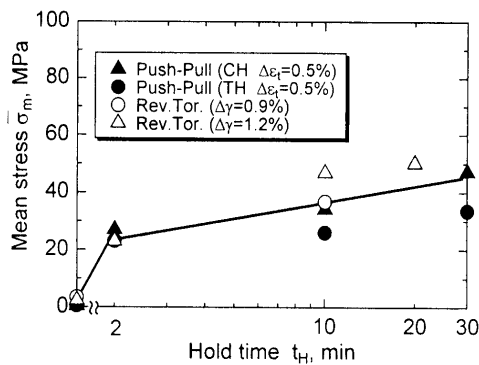


Fig.4 Experimental relation between mean stress and hold time.

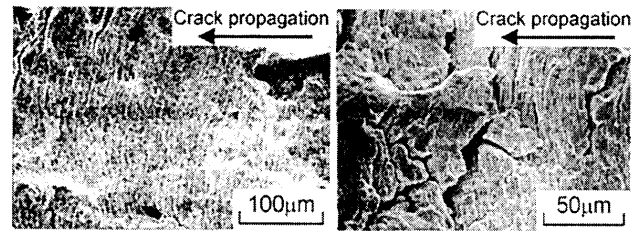
**3.2 破面観察結果** 引張・圧縮負荷条件下での CH 波と TH 波の疲労試験終了後の破面観察の結果の例を図 5 に示す。図より CH 波の破面には PP 波と同様のストライエーションが観察され、粒内破壊を生じていることがわかる。一方、図 (b) に示した TH 波の場合、粒界破壊を生じている部分が認められることからき裂伝ばに保持期間中のクリープの影響が大きいと考えられる。

図 6 に繰返しねじり負荷条件下での PP 波と保持台形波の破面観察結果を示す。なお両波形とも試験終了後の側面を観察した場合、き裂はモード I 方向の酸化被膜の割れに沿ってジグザグに巨視的にはモード II 方向に進展する様相が観察されたが、ジグザグに進展している領域は表面から約 200  $\mu$ m 程度であり、板厚内部の大部分は同図に示す様相であった。図より、台形波の破面は PP 波のそれとほぼ同様の粒内破壊の様相が認められる。

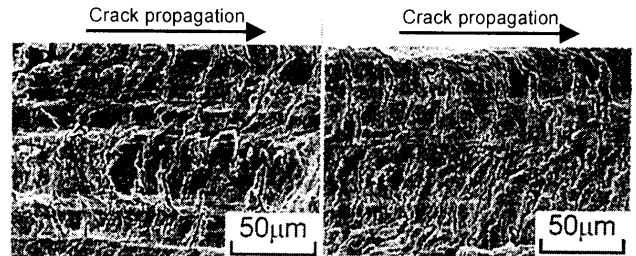
**3.3 き裂伝ばに及ぼすひずみ波形の影響** 前節の破面観察の結果、CH 波のき裂伝ばには保持期間中のクリープの影響は小さく、疲労過程で生じる引張り側平均応力の影響が大きいと考えられる。この引張り側の平均応力はき裂の開閉口挙動に影響を及ぼし、平均応力を伴わない PP 波と比較して有効応力拡大係数幅が増加すると考えられる。ここでは、CH 波で生じる引張り側平均応力の影響を考慮するため、引張り側の応力振幅より求めた応力拡大係数範囲と引張り側の荷重-変位曲線から求めた面積を用いて J 積分範囲  $\Delta J_I$  を求めた。CH 波と PP 波のき裂伝ば速度を  $\Delta J_I$  で整理した結果を図 7(a) に示す。図より、 $\Delta J_I$  でき裂伝ば速度を整理した場合、CH 波のき裂伝ば速度は PP 波のそれとほぼ同程度の値を示している。従って、CH 波におけるき裂伝ば速度の加速には平均応力が影響を及ぼしていると考えられ、平均応力を考慮することにより定量的に評価できると考えられる。

一方、TH 波の破面には粒界破壊の様相が見られたことから保持期間中のクリープがき裂伝ばに影響をおよぼしていると考えられる。荷重制御条件下での引張り保持台形波のき裂伝ば速度に関してはこれまで多くの研究が行われ、 $J_I$  と  $J_e$  の大小関係からき裂伝ば速度が疲労支配又はクリープ支配となるとの報告<sup>(3)</sup>や  $\Delta J$  を両者の和として評価できるという報告<sup>(4)</sup>があるが、ひずみ制御条件下での研究例は少ない。ここでは、TH 波で生じる圧縮側平均応力とクリープの影響を考慮するため CH 波と同様の考え方に基つき  $\Delta J_I$  でき裂伝ば速度の整理を行った。その結果を図 7(b) に示す。図より、TH 波のき裂伝ば速度は PP 波のそれとほぼ同程度の値となっている。従って、TH 波のき裂伝ば速度は平均応力とクリープの影響を考慮することにより定量的に評価できると考えられる。

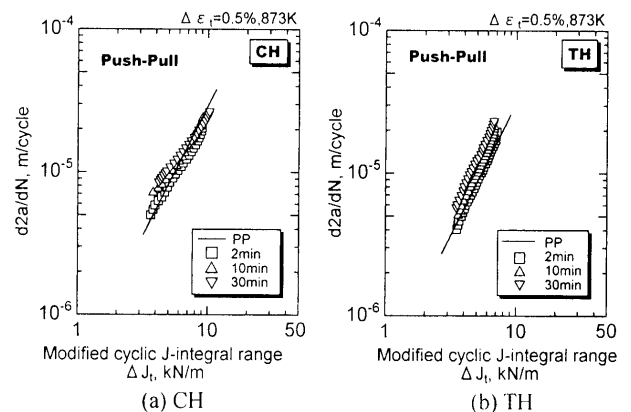
繰返しねじり条件下のき裂伝ば速度を  $\Delta J$  で整理した場合には、ひずみ波形の影響は認められなかった。これは、き裂がモード II 方向に進展するため、引張・圧縮負荷の場合と比



(a) CH (b) TH  
Fig.5 SEM observation of fracture surface (push-pull).



(a) PP (b) Trapezoidal (20min)  
Fig.6 SEM observation of fracture surface (reversed torsion).



(a) CH (b) TH  
Fig.7 Relationship between crack propagation rate and modified cyclic J-integral range.

較してき裂開閉口の影響が小さいことによると考えられる。このため、繰返しねじり負荷の場合、き裂伝ばに及ぼす平均応力の影響が小さく、き裂伝ば形態も PP 波と大きな差が見られなかったことから、保持期間中のクリープの影響も小さいためにき裂伝ば速度におよぼすひずみ波形の影響が小さかったものと思われる。

#### 4. 結 言

- 1) 引張・圧縮条件下での引張り保持及び圧縮保持台形波のき裂伝ば速度は保持時間の増加に伴い増加するが、繰返しねじり条件下の場合にはひずみ波形の影響は小さいことが明らかとなった。
- 2) 引張・圧縮と繰返しねじりの何れの負荷条件においてもひずみ波形の非対称性により保持と逆側に平均応力を生じることが明らかとなった。
- 3) き裂伝ば速度におよぼす圧縮ひずみ保持の影響は、平均応力の影響を考慮することにより定量的に評価できる。引張りひずみ保持の影響は保持期間中のクリープと平均応力の影響を考慮することにより定量的に評価できることが明らかとなった。

#### 参考文献

- (1) 西野精一・ほか 4 名，材料，48(1999)，610-615。
- (2) 松原雅昭・ほか 1 名，火力原子力発電，43，(1992)，356-364。
- (3) 平修二・ほか 3 名，材料，28 (1979)，414-419。
- (4) 大路清嗣・ほか 3 名，機論，50-454，(1984)，1218-1227。