改良 9Cr-1Mo 鋼のき裂伝ば挙動に及ぼす負荷ひずみ波形の影響 Influence of Strain Waveform for Crack Propagation Behavior of Mod.9Cr-1Mo Steel

○ 伊藤 竜人 (富山大院) 正 西野 精一 (富山工大)
正 塩澤 和章 (富山工大) 新甚 博之 (北陸電力)
川上 智毅 (北陸電力) 正 林 義忠 (北陸電力)

Tatsuhito ITO, Graduate student of Toyama University, Gofuku, Toyama, 930-8555
Seiichi NISHINO, Kazuaki SHIOZAWA, Toyama University, Gofuku, Toyama, 930-8555
Hiroyuki SHINJIN, Tomoki KAWAKAMI, Yoshitada HAYASHI, Hokuriku Power Company, Hisakata-machi, Toyama

Key Words : Low cycle fatigue, Mod.9Cr-1Mo steel, Elevated-temperature, Fatigue crack propagation, Waveform, J-integral, Mean stress, Creep

1. 緒言

近年、火力発電プラント等では高温強度部材にき裂の存在を認める損傷許容寿命評価の手法により、経済効率の向上を図る取り組みが検討される傾向にある。このため、火力発電プラントの運転条件に対応したき裂進展特性の把握による寿命評価技術の確立は早急な解決を求められている課題である。

改良 9Cr-1Mo 鋼は火力発電プラント等の高温強度部材として利用され始めている材料であり、これまでの研究において高温低サイクル疲労寿命に及ぼすひずみ波形の影響が従来のオーステナイト系 SUS304 鋼等とは異なり、引張ひずみ保持条件よりも圧縮ひずみ保持条件で短寿命となることが報告されている。この改良 9Cr-1Mo 鋼の破損寿命に及ぼすひずみ波形の影響の原因としては①平均応力の影響、②酸化膜割れの影響③クリープの影響が挙げられているが、それらがき裂伝ばに対してどのように影響を及ぼしているかは明確とはなっていない。

本研究では改良 9Cr-1Mo 鋼を対象として、疲労及びクリープ・疲労条件下でのき裂伝ば試験を行い、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とした。

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 の薄肉中空円筒平滑試験片に機械加工し、試験片外面および内面を 2000 番までエメリー紙で研磨後、外面は鏡面仕上げを施し、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試験に供した。

2.2 実験方法 実験には電気炉付電気・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、全ひずみ範囲制御で試験を行った。負荷波形は完全面振対称三角波(PP)、引張ひずみ保持台形波(TH)、圧縮ひずみ保持台形波(CH)とした。PP 波は全ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_p = 0.5\%$ 、0.8% の 2 種類、TH 波と CH 波は $\Delta \epsilon_p = 0.5\%$ で保持時間 2 分、10 分、30 分の条件で行った。

また、き裂長さ測定方法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 の一定電流を流し、切欠き円孔をはさんで 4mm の位置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。なお、本研究ではき裂伝ばに及ぼす切欠き円孔の影響を取り除くため、長さ 0.7mm 以上のき裂を対象とした。

3. 実験結果および考察

3.1 高温低サイクル疲労試験結果 図 1 に各ひずみ波形の試験で得られたき裂長さとの関係を示す。図より切欠き円孔から発生したき裂長さが 1mm に達するまでの繰返し数(N_f)および試験片が破損した状態であるき裂長さが

9mm に達するまでの繰返し数(N_b)とも CH 波<TH 波<PP 波の順であることが分かる。また CH 波と TH 波の場合 N_f , N_b とも保持時間の増加に伴い寿命が低下している。

図 2 に疲労試験で得られた各サイクル毎の最大応力、最小応力ならびに両者を平均した平均応力(σ_m)の繰返しに伴う変化の例を示す。図より、本材料の場合繰返しに伴い応力振幅が低下する繰返し軟化挙動を示すことが分かる。平均応力の値の繰返しに伴う変化は小さく、PP 波ではほぼ 0 であるのに対して、TH 波では圧縮側に生じており、CH 波では引張側の値である。なお、各台形波で生じた平均応力は保持時間が長い条件ほど大きな値を示した。

疲労試験後の破面観察の結果、PP 波と CH 波ではストライエーションの見られる粒内破壊の様相を呈していたのに対して、TH 波ではストライエーションの見られる箇所と一部で凹凸の大きい粒界破壊を示す箇所が認められた。

3.2 J 積分の変動幅 ΔJ によるき裂伝ば速度の整理 各ひずみ波形の疲労試験で得られたき裂伝ば速度と繰返し J 積分範囲 ΔJ との関係を図 3 に示す。ここで繰返し J 積分範囲は疲労 J 積分範囲 ΔJ_f と引張側のクリープ J 積分範囲 ΔJ_c の和として求めた。なお、 ΔJ_f および ΔJ_c は次式より算出した。

Fig.1 Relationship between crack length and number of cycles.

Fig.2 Relationship between stress and number of cycles.

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	0.20	0.076	0.046

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

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

ここで、 ΔK は全応力振幅を用いた応力拡大係数範囲、 E は873Kでのヤング率、 n は応力指数、 S_f は疲労中における引張行程の荷重-変位曲線より求めた面積、 S_c はひずみ保持期間中(クリープ)の荷重-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CH波およびTH波のき裂伝ば速度はPP波のそれと比較して高い値を示しているが、き裂伝ば速度の加速の割合はCH波の方がTH波よりも大きいことが分かる。

図4に各 ΔJ の値におけるき裂伝ば速度と保持時間との関係を示す。図より、CH波とTH波で保持時間に伴うき裂伝ば速度の加速の割合が異なり、CH波では2分間の保持においても大きくき裂伝ば速度が加速し、その後直線的に加速しているのに対し、TH波の場合、2分保持ではき裂伝ば速度の大きな加速は認められないが、保持時間の増加に伴い単調にき裂伝ば速度が増加しているのが分かった。

3.3 き裂伝ば速度に及ぼす圧縮ひずみ保持の影響 CH波の疲労試験後の破面観察の結果、PP波と同様のストライエーションの見られる粒内破壊の様相を呈していたことから、保持期間中のクリープの影響は小さいと考えられる。ここでは「酸化の影響」と「平均応力の影響」について検討した。

酸化膜割れの影響を検討するため、平均応力やクリープの影響を生じない条件として引張行程と圧縮行程で応力0の状態を保持(保持時間2分、4分)をする応力0保持波の疲労試験を行った。得られたき裂伝ば速度と ΔJ との関係を図5に示す。図より、応力0保持波のき裂伝ば速度はPP波のそれと同程度であり、またき裂伝ば速度に保持の影響は認められない。したがって、き裂伝ば速度に及ぼす試験片酸化の影響は小さいと考えられる。

CH波で見られた引張側の平均応力は、き裂の開閉口挙動に影響を及ぼすことが考えられる。本研究では電気炉を用いて加熱して低サイクル疲労試験を行ったため、き裂の開閉口挙動を観察するのは困難である。このため模擬的ではあるがCH波の疲労試験をき裂長さが3mmに達するまで行った後、室温条件下で切欠き円孔をまたいでひずみゲージを貼付しき裂の開閉口挙動を検討した結果、CH波の場合PP波と比較して開口荷重が低下することが確認された。すなわちCH波の場合、平均応力の影響により有効応力拡大係数が増加することが考えられる。CH波で生じる平均応力の影響を考慮するため、引張側の応力振幅より求めた応力拡大係数範囲 ΔK 、および引張側の荷重-変位曲線から求めた面積を用いてJ積分範囲 ΔJ_i を求めた。CH波およびPP波のき裂伝ば速度を ΔJ_i で整理した結果を図6(a)に示す。図より ΔJ_i でCH波およびPP波の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。したがって、

Fig.3 Relationship between crack propagation rate and cyclic J-integral range.

CH波のき裂伝ば速度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思われる。

3.4 き裂伝ば速度に及ぼす引張りひずみ保持の影響 荷重制御下で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、 ΔJ_f と ΔJ_c の大小関係からき裂伝ば速度が疲労支配またはクリープ支配となる報告やき裂伝ば速度を両者の和として評価できるという考え方が報告されているが、ひずみ制御条件下の研究例はあまり見られない。図3に示したように、 ΔJ でき裂伝ば速度を整理した場合、TH波のき裂伝ば速度はPP波のそれと比較して高い値を示した。ここではTH波で生じる「圧縮側平均応力の影響」と「クリープの影響」について検討した。図6(b)にCH波の場合と同様の考え方に基づいてPP波およびTH波のき裂伝ば速度を ΔJ_i で整理した結果を示す。図より ΔJ_i でき裂伝ば速度を整理した場合、TH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。したがって、TH波のき裂伝ば速度には平均応力とクリープが影響を及ぼしていると考えられ、平均応力とクリープを考慮することにより定量的に評価できると思われる。

5. 結言

- (1)き裂発生繰返し数およびき裂が9mmに達するまでの繰返し数はCH波<TH波<PP波となることが分かった。
- (2)疲労試験においてCH波では引張側に平均応力が生じ、TH波では圧縮側に平均応力が生じることが明らかとなった。
- (3)き裂伝ば速度に及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ことが明らかとなり、酸化およびクリープの影響は小さいと考えられる。
- (4)き裂伝ば速度に及ぼす引張りひずみ保持の影響は、ひずみ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り、酸化の影響は小さいと考えられる。

Fig.4 Relationship between crack propagation rate and hold time.

Fig.5 Relationship between crack propagation rate and cyclic J-integral range.

Fig.6 Relationship between crack propagation rate and modified cyclic J-integral range.