316 FR 鋼のクリープ及び疲労特性に及ぼす疲労及び クリープ疲労損傷の影響に関する検討*

(第 2 報, クリープ及び疲労特性に及ぼすクリープ疲労損傷の影響)

山 内 雅 文^{*1}, 中 馬 康 晴^{*1}
大 谷 知 未^{*2}, 高 橋 由 紀 夫^{*3}

Study on the Effect of Prior Fatigue and Creep-Fatigue Damage on the Fatigue and Creep Characteristics of 316 FR Stainless Steel (2nd Report, The Effect of Prior Creep-Fatigue Damage on the Creep and Fatigue Characteristics)

Masafumi YAMAUCHI^{*4}, Yasuharu CHUMAN,
Tomomi OTANI and Yukio TAKAHASHI

^{*4} Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Nagasaki R & D Center,
Fukahori-machi 5-717-1, Nagasaki, 851-0392 Japan

The effect of prior creep-fatigue damage on the creep and the fatigue characteristics was studied to investigate the creep-fatigue life evaluation procedure of 316FR stainless steel. Creep and fatigue tests were conducted at 550°C by using the specimen exposed to prior creep-fatigue cycles at the same temperature and interrupted at 1/4 Nf, 1/2 Nf and 3/4 Nf cycle. The creep and fatigue strength of the pre-damaged material showed monotonic reduction with the prior creep-fatigue damage compared with the virgin material. The creep ductility also showed monotonic reduction with the prior creep-fatigue damage. These results were evaluated by the stress-based Time Fraction Rule and the strain-based Ductility Exhaustion Method. The result showed that the application of the Ductility Exhaustion Method to the creep-fatigue damage evaluation is more promising than the Time Fraction Rule.

Key Words: 316FR Stainless Steel, Creep-Fatigue, Time Fraction Rule, Ductility Exhaustion Method, Creep Damage, Fatigue Damage, Creep Strength, Creep Ductility

1. 結 言

本研究では高速増殖炉高温構造用として新しく開発された 316FR ステンレス鋼^①についてそのクリープ疲労寿命評価法の確立に資するため、疲労もしくはクリープ疲労損傷を受けた材料のクリープ試験もしくは疲労試験を行って疲労およびクリープ特性に及ぼす損傷の影響を検討している。また、高速増殖炉用高温構造設計手法^{②③}として採用が検討されている時間消費則および延性消耗則による評価を行ってその妥当性を検討している。

前報^④では疲労中途止試験を行い、疲労損傷を受けた試験片の残存クリープ破断強度および延性を調査することにより、時間消費則あるいは延性消耗則における疲労損傷およびクリープ損傷の加算性並びにその妥当性を検討し、従来の応力ベースの時間消費則よりもひずみベースの延性消耗則の方が有望であることを確認した。本報告ではクリープ疲労中途止め試験を行って、クリープ疲労損傷を受けた試験片の残存クリープ破断強度および延性を調査するとともに、両評価法の妥当性を検討した結果について述べる。

2. 材料および実験方法

2-1 供試材

供試材は前報^④に同じ 316FR 鋼均質化熱処理材の板材 (板厚 50 mm) である。

* 原稿受付 2000 年 4 月 20 日。

^{*1} 正員, 三菱重工業(株)長崎研究所(☎ 851-0392 長崎市深堀町 5-717-1)。

^{*2} 三菱重工業(株)神戸造船所(☎ 652-8585 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1)。

^{*3} 正員, (財)電力中央研究所(☎ 201-8511 狛江市岩戸北 2-11-1)。

E-mail: yamauchi@ngsrdc.mhi.co.jp

2.2 試験方法

クリープ疲労損傷による疲労およびクリープ特性の変化を把握するため、クリープ疲労損傷度の異なる損傷材についてクリープ試験および疲労試験を実施した。試験片形状および損傷材作製試験並びにその後のクリープ試験の試験方法は前報⁽⁴⁾に同じである。損傷材の疲労試験については、クリープ疲労試験中途止め後そのまま継続して実施した。

2.3 試験条件

表1および表2にクリープ疲労試験中途止め後のクリープ試験および疲労試験の条件をそれぞれ示す。クリープ疲労損傷材を作製するため、中途止めクリープ疲労試験を実施した。試験温度は550℃、ひずみ範囲は1%、ひずみ速度は0.1%/sec、保持は引張側ピークひずみ保持で時間は1hである。まず試験片破断までのクリープ疲労試験を実施し、本条件におけるクリープ疲労寿命($N_f=1700$ サイクル)を決定した。クリープ疲労損傷材作成のための中途止めサイクル数は、この試験結果を基に1/4 N_f 、1/2 N_f 、3/4 N_f の3種類とした。ここで、 N_f は繰返し中の引張側荷重が定常値から25%低下したサ

イクル数で定義した。また、組織観察用としてそれぞれの中途止め試験片を別途作成した。クリープ疲労損傷材のクリープ試験は温度550℃で2応力条件下で行い、疲労試験は中途止め後試験条件を保持なしの条件に変更して継続して実施した。

3. 試験結果

3.1 クリープ疲労中途止め試験結果

図1に中途止めサイクル数決定のため、破断まで実施した試験片の繰返しに伴う応力範囲の変化および決定した中途止め位置を示す。損傷材は図中の矢印で示した位置で試験を中断したものであり、3種の損傷材とも中途止め時の応力範囲値はほぼ同じであった。図2にクリープ疲労損傷材の断面の光学顕微鏡組織を示す。クリープ疲労損傷が進むにつれ、き裂が粒界に沿って内部に成長しているのが確認できる。1/4 N_f 損傷材では表面に1結晶粒程度の深さの粒界き裂が多数認められた。1/2 N_f および3/4 N_f クリープ疲労損傷材ではき裂が大きくなり、その最大表面長さはそれぞれ約1.5mm および約2.8mmであった。また、損傷が進むにつれ試験片内部にクリープポイドが多く観察された。

Table 1 Test conditions of pre-creep fatigue test and subsequent creep test.

Pre-Creep fatigue test					Creep test	
Temp. (°C)	Strain range (%)	Strain rate (%/sec)	Hold time (h)	Interrupted cycles	Temp. (°C)	Stress (MPa)
550	1.0	0.1	1	1/4 N_f (425)	550	323
						353
				1/2 N_f (850)	550	323
						353
				3/4 N_f (1300)	550	323
						294

Table 2 Test conditions of pre-creep fatigue test and subsequent creep test.

Pre-Creep fatigue test					Fatigue test		
Temp. (°C)	Strain range (%)	Strain rate (%/sec)	Hold time (h)	Interrupted cycles	Temp. (°C)	Strain range (%)	Strain rate (%/sec)
550	1.0	0.1	1	1/4 N_f (425)	550	1.0	0.1
						1.0	0.1
				1/2 N_f (850)	550	1.0	0.1
						1.0	0.1
				3/4 N_f (1300)	550	1.0	0.1
						1.0	0.1

Fig.1 Stress range vs number of cycles relationship in creep-fatigue test.

(a) $N=1/4N_f$

(b) $N=1/2N_f$

(c) $N=3/4N_f$

Fig.2 Microstructure of the specimen interrupted in creep-fatigue test.

3-2 クリープ疲労中途止め材のクリープ試験結果

図3にクリープ疲労損傷材のクリープ破断強度を未損傷材⁽³⁾と比較して示す。1/2Nf 損傷までは未損傷材と比べて寿命低下が認められなかった疲労損傷材⁽⁴⁾とは異なり、クリープ疲労損傷材は初期の1/4Nf 損傷から寿命低下が認められた。なお、3/4Nf 損傷材の323MPaでのクリープ試験は負荷直後瞬時破断した。図4にクリープ疲労損傷材の最小クリープひずみ速度を同様に未損傷材⁽³⁾と比較して示す。クリープ破断強度の場合と同様、1/2Nf 損傷までは未損傷材と差が認められなかった疲労損傷材の場合⁽⁴⁾とは異なり、クリープ疲労損傷材では初期の1/4Nf 損傷からクリープひずみ速度の増大が認められた。図5に最小クリープ速度と破断時間の関係

Fig.3 Creep rupture strength of creep-fatigue-damaged specimen.

Fig.4 Minimum creep rate of creep-fatigue-damaged specimen.

Fig.5 Monkman-Grant relationship of creep-fatigue-damaged specimen.

を示す。疲労損傷材の1/4Nfおよび1/2Nf 損傷の場合は未損傷材とほぼ同じであったが、クリープ疲労損傷材の1/4Nfおよび1/2Nf 損傷では未損傷材に比べ Monkman-Grant 定数が小さくなっている。図6および図7にクリープ疲労損傷材のクリープ破断伸びおよびクリープ破断絞りをそれぞれ示す。クリープ疲労損傷材の破断延性は損傷の増大とともに低下しており、疲労損傷材⁽⁴⁾に比べて破断延性の低下は大きい。図8にクリープ疲労損傷材のクリープ試験後の破面外観観察結果を、図9に破面のSEM観察結果例を示す。1/4Nf 損傷材では疲労破面および粒界破面は認められず、全て延性破面であった。1/2Nf 損傷材および3/4Nf 損傷材では粒界破面が明確に観察できた。なお、クリープ疲労による粒界破面とその後のクリープによる粒界破面とは識別が困難であった。また、1/4Nf 損傷材では図2(a)に示したとおり1結晶粒程度の粒界破面が表面近傍に観察されるはずであるが、これが観察されなかったのはその後のクリープ試験において酸化が進み粒界破面としての検出が困難になったためではないかと考えられる。

3-3 クリープ疲労中途止め材の疲労試験結果

図10にクリープ疲労損傷材の疲労強度を前報で示した未損傷材の試験結果⁽⁴⁾と比較して示す。損傷の増大に伴い疲労寿命は低下している。なお、3/4Nf 損傷材はクリープ疲労試験中途止め後、試験条件を保持なし条件に変更して試験を開始したとこ

Fig.6 Rupture elongation of creep-fatigue-damaged specimen.

Fig.7 Reduction of area of creep-fatigue-damaged specimen.

Fig.8 Macroscopic view of fracture surface after creep test of creep fatigue-damaged specimen.

Fig.9 Microscopic view of fracture surface after creep test of creep fatigue-damaged specimen.

Fig.10 Fatigue strength of creep fatigue damaged specimen.

Fig.11 Stress range vs number of cycles relationship of creep fatigue damaged specimen.

る瞬時破断した。図 11 に繰り返しに伴う応力範囲の変化を未損傷材の試験結果⁽⁹⁾と比較して示す。応力範囲は未損傷材の応力範囲の定常値とほぼ同じであった。

4. 考 察

4.1 クリープ特性におよぼすクリープ疲労損傷の影響

前報⁽⁹⁾同様、時間消費則および延性消耗則について、疲労損傷とクリープ損傷の加算性について検討する。

図 12 に 1/4Nf, 1/2Nf および 3/4Nf それぞれの中途止めまでの疲労損傷 Df およびクリープ損傷 Dc の時間消費則および延性消耗則による評価結果を示す。疲労損傷は中途止めまでのサイクル数と未損傷材の疲労寿命 (Nf=2250 サイクル)⁽⁹⁾の比として算出した。また、1 サイクル中のクリープ損傷は 1/2Nf サイクルにおける保持中のリラクセーション曲線から次式により算出した。

$$\text{時間消費則の場合: } Dc = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t(i)}{tr(i)} \quad (1)$$

$$\text{延性消耗則の場合: } Dc = \frac{\varepsilon_c}{\delta} \quad (2)$$

Fig.12 Results of evaluation of prior fatigue and creep damage by Time Fraction Rule and Ductility Exhaustion Method at interrupted cycles in prior creep-fatigue test.

Fig.13 Variation of creep strength with creep-fatigue damage.

ここで、時間消費則による評価では、リラクセーション曲線を各部分の応力差がクリープ損傷計算値に影響しない程度に十分小さくなる n 個の部分に分割しており、 $\Delta t(i)$ は i 番目の部分の時間増分、 $tr(i)$ は i 番目の部分の応力に対する未損傷材のクリープ破断時間 (図 3 に示した実線) である。また、延性消耗則における ε_c は保持中に生じるクリープひずみで、 δ は材料のクリープ破断伸びで、前報⁽⁹⁾と同様 $\delta=40\%$ とした。

図から判るように、時間消費則の場合計算されるクリープ損傷は疲労損傷に比べて非常に小さく、延性消耗則による評価では両者はほぼ同程度となる。

図 13 に損傷材と未損傷材の寿命の比とクリープ疲労損傷の関係を示す。疲労損傷材のクリープ破断寿命は 1/2Nf 損傷まで低下しなかった⁽⁹⁾が、クリープ疲労損傷材のクリープ破断寿命は初期損傷の段階から損傷度に応じて低下しており、クリープ疲労損傷中のクリープ損傷が主として寄与していると考えられる。但し、この損傷材のクリープ破断寿命の低下と図 12 に示した時間消費則により計算される非常に小さなクリープ損傷とは対応が悪い。すなわち、図 13 の寿命低下分 (損傷値としては 0.6~0.8) は図 12 の時間消費則によるクリープ損傷計算値と対応すべきであるが、後者は非常に小さく両者の差は大きい。図 14 にクリープ破断延性に及ぼすクリー

Fig.14 Variation of rupture elongation with creep-fatigue damage.

Fig.15 Variation of fatigue strength with creep-fatigue damage.

Fig. 16 Dc-Df diagram by Time Fraction Rule.

Fig. 17 Dc-Df diagram by Ductility Exhaustion Method.

ブ疲労損傷の影響を示す。延性は疲労損傷の場合と同様、クリープ疲労損傷とともに明らかに低下する。また、クリープ疲労損傷に伴う延性低下量は、疲労損傷の場合⁽⁴⁾よりも大きい。この差はクリープ疲労試験において保持中に消費されるクリープ延性と考えることができる。破断延性の低下は図 12 に示した延性消耗則による評価結果にほぼ対応したものとなっている。

4.2 疲労特性におよぼすクリープ疲労損傷の影響

図 15 に疲労特性に及ぼすクリープ疲労損傷の影響を示す。クリープ疲労損傷の増大に伴ってほぼ線形的に疲労寿命が低下する傾向があり、クリープ疲労損傷と疲労損傷の加算性は良いものと思われる。

4.3 クリープ疲労寿命評価法の検討

図 16 および図 17 にクリープ疲労中途止め試験およびその後のクリープ試験並びに疲労試験の両試験結果の時間消費則および延性消耗則による評価結果をそれぞれ示す。具体的評価方法は前報⁽⁴⁾に示したとおりである。

図 16 に示した時間消費則による評価では、クリープ疲労後クリープ試験の場合には ASME Code⁽⁵⁾等で使用されている評価線に近い結果となり、クリープ疲労後疲労試験の場合にはクリープ損傷は非常に小さく、ほとんど零である。前報⁽⁴⁾で示した疲労試験後のクリープ試験ではクリープ損傷は疲労損傷によらずほぼ 1 となる結果が得られており、負荷履歴により損傷評価結果が異なり、時間消費則は負荷履歴依存性がある。

図 17 に示した延性消耗則による評価では、疲労損傷材の場合⁽⁴⁾と同様、クリープ疲労損傷材も $D_c + D_f = 1$ の評価線に近い結果となっており、クリープ損傷と疲労損傷の線形加算則がほぼ成立し、これは負荷履歴に依存しない。

5. 結 言

316FR 鋼についてクリープ疲労中途止め材のクリープ試験および疲労試験を実施し、クリープ疲労損傷によるクリープ特性および疲労特性の変化を調べると共に、時間消費則および延性消耗則による評価を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) クリープ疲労損傷材のクリープ破断寿命、クリープ破断延性および疲労寿命は損傷の初期段階から損傷の増大と共に単調に低下する。
- (2) 時間消費則による寿命評価結果は負荷履歴に依存し、疲労後クリープ、クリープ疲労後クリープ、クリープ疲労後疲労で評価損傷値は大きく異なる。
- (3) 延性消耗則による寿命評価結果は負荷履歴依存性はなく、疲労後クリープ、クリープ疲労後クリープ、クリープ疲労後疲労すべての場合とも $D_c + D_f = 1$ でほぼ評価できる。

なお、本研究は通産省からの委託によって電中研が実施した「発電用新型炉技術確証試験」において実施されたものである。

参考文献

- (1) 中澤崇徳, 安保秀雄, 谷野満, 小松肇, 田下正宜, 西田隆, 鉄と鋼, 75-8, (1989) 1346.
- (2) M. Ueta, T. Nishida, H. Koto, M. Sukekawa, and K. Taguchi, PVP-Vol. B, (1995), 423-428, ASME.
- (3) Y. Takahashi, PVP-Vol. 365, (1998), 159-166, ASME.
- (4) 山内雅文, 中馬康晴, 大谷知未, 高橋由紀夫, 機論 A, 67-653, (2001).
- (5) ASME B&PV Code, Section III, Division 1-Subsection NH (1995).