SUS 304 長時間クリープ疲労寿命評価[†]

川崎 弘 嗣* 上野 文 義** 青 砥 紀 身*
一 宮 正 和** 和 田 雄 作*

Evaluation of Long Term Creep-Fatigue Life for Type 304 Stainless Steel

by

Hirotsugu KAWASAKI*, Fumiyoshi UENO**, Kazumi AOTO*
Masakazu ICHIMIYA** and Yusaku WADA*

The long term creep-fatigue life of type 304 stainless steel was evaluated by the creep-fatigue life prediction method based on a linear damage fraction rule. The displacement controlled creep-fatigue tests were carried out, and the time to failure of longer than 10000 hours was obtained. The creep damage of long term creep-fatigue was evaluated by taking into account the stress relaxation behavior with elastic follow-up during the hold period. The relationship between life reduction of creep-fatigue and fracture mode was provided by the creep cavity growth. The results of this study are summarized as follows;

(1) The long term creep-fatigue data can be reasonably evaluated by the present method. The predicted lives were within a factor of 3 of the observed ones.

(2) The present method provides the capability to predict the long term creep-fatigue life at lower temperatures as well as that at the creep dominant temperature.

(3) The value of creep damage for the long term creep-fatigue data increased by elastic follow-up. The creep-fatigue damage diagram intercepted between 0.3 and 1 can represent the observed creep-fatigue damages.

(4) The cavity growth depends on the hold time. The fracture of long term creep-fatigue is caused by the intergranular cavity growth. The intergranular fracture of creep-fatigue is initiated by the cavity growth and followed by the microcrack propagation along grain boundaries starting from creep cavities.

Key words : Long term creep-fatigue, Area fraction of cavity, Elastic follow-up,
Creep damage, Linear damage fraction rule

1 緒 言

FBR の高温構造設計に適用するため、筆者らは線形損傷則に基づく簡便で信頼性の高いクリープ疲労評価法の研究を進めてきた¹⁾。これまで取得されてきたデータは、比較的中・短時間のクリープ疲労試験によるものではあるが、各種のひずみ履歴を与えた試験に対しても、本評価法は妥当な精度を得ている²⁾。しかし、実機条件へ外挿すると不確実性が大きくなるため、十分安全裕度を考慮した評価がなされてきた。このため、長時間試験データを取得して評価法の長時間外挿性に対する精度を向上させ、安全裕度の適正化を図る必要がある。

そこで本研究では FBR 主要構造材料である SUS

304 に対し、長周期の低サイクル疲労試験と短周期の高サイクル疲労試験という 2 つのタイプの長時間クリープ疲労試験を実施し、筆者らの提案している評価法の外挿性を検討する。また、長時間側クリープ疲労のミクロの破損形態についても調べ、評価法外挿性との関係を検討した。

2 供試材および試験方法

本研究に用いた供試材は、高速炉主要構造材料である SUS304 熱間圧延鋼板 (40 mm¹) である。その化学成分と熱処理条件を Table I に示す。

試験片形状を Fig. 1 に示す。平行部長さ 25 mm, GL=20 mm, 直径 10 mm の平滑丸棒試験片である。また、変位を制御するため肩部にツバが付いており、

[†] 原稿受理 平成 4 年 3 月 13 日 Received Mar. 13, 1992

* 正会員 動力炉・核燃料開発事業団 〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町, Power Reactor & Nuclear Fuel Develop. Corp., Higashi-Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-13

** 動力炉・核燃料開発事業団 〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町, Power Reactor & Nuclear Fuel Develop. Corp., Higashi-Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-13

Table I. Chemical compositions and heat treatment condition of SUS304.

(wt %)							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
0.05	0.60	0.87	0.026	0.002	8.94	18.59	0.022

Heat treatment: 1100°C×48 min W. Q.

Fig. 1. Long term creep-fatigue test specimen.

GL のひずみは制御されず計測されるだけである。

使用した長時間クリープ疲労試験機は、長時間の保守性・安定性から電気機械サーボであり、平行部のひずみが目標のひずみとなるようにあらかじめ決められた肩部の変位を制御し、保持中は一定変位で保持される。この変位保持制御のため、保持中の平行部のひずみが増加し、いわゆる弾性追従を伴う試験となる。また、試験データは小型計算機によるオンラインサンプリングにより、定められた繰返し数に対し、繰返しの応力-ひずみヒステリシス曲線と保持中の応力緩和曲線に関してデータ収集を行った。

試験は引張ピークにおいてひずみ保持をする台形波とし、実機負荷条件に近いひずみ速度として 0.002 %/sec で行った。試験条件としては、実機運転温度に近い 550°C とし、実機負荷条件の低ひずみ側と長時間保持側の外挿を分けて模擬するものとし、0.7% 以上の高ひずみ範囲の長時間保持、および 0.5% 以下の低ひずみ範囲の短時間保持試験とした。長時間領域の条件として、従来取得されてきた破損時間にして 6 カ月程度のデータを越えるものを取得することを目的とした。また比較的低温領域を対象として、450, 500°C の 2 温度においてひずみ範囲 0.5% の試験を実施した。

3 結果および考察

3.1 長時間クリープ疲労試験結果

得られた長時間クリープ疲労の試験結果を Fig. 2 に示す。図には、本供試材と同一ヒートの従来取得されたひずみ速度 0.1 %/sec のデータおよび対称三角波の平均疲労曲線³⁾も示した。保持時間とともにクリープ疲労寿命は低下している。ひずみ速度 0.002 %/sec の長時間クリープ疲労の試験結果は、ひずみ速度依存性を考慮した平均疲労曲線と比較すると、60, 600 min 保持では明瞭な寿命低下を示し、ひずみ速度が遅い場合も保持により寿命が顕著に低下していることがわかる。また従来のひずみ制御によるクリープ疲労寿命と

Fig. 2. Creep fatigue life of SUS 304.

比べると、今回の試験では疲労損傷にひずみ速度依存性があり、弾性追従によりクリープ損傷の割増しがあったが、特に寿命低下が大きいという傾向はみられなかった。

3.2 長時間クリープ疲労の破損形態の観察結果

クリープ疲労の寿命低下と破損形態の関係を検討するため、粒界破壊を支配する粒界キャビティの発生状態について調べた。キャビティは、試験片平行部で破損部から約 5 mm だけ離れたところの縦断面を SEM で 10000 倍で観察し、写真を画像処理装置に認識させ、空洞部分を測り空隙部分は除いてある。測定は、キャビティの個数が 100 個以上になるまで試験片径方向の全長にわたって往復観察し、測定したキャビティ面積の総和を観察領域の面積の総和で除した粒界キャビティの面積率を求めた。

Fig. 3 は粒界キャビティの面積率と保持時間との関係を示したものである。粒界キャビティの面積率は、ひずみ範囲でも異なるが保持時間による影響が大きい。粒界キャビティの発生量は、6 min, 60 min 保持では非常に小さいが、600 min 保持になると急激に多くなる。したがって、保持中にキャビティは形成されるが、それは比較的短時間保持でも発生しており、長時間条

Fig. 3. Effect of hold time on area fraction of cavity.

Fig. 4. Effect of area fraction of cavity on creep-fatigue life reduction.

件では急激に増加する。また同じ保持時間では、低ひずみ範囲の方が保持サイクルが多くなるため、キャビティは発生しやすい傾向にあるといえる。

Fig. 4は、平均疲労寿命に対するクリープ疲労の寿命低下率と、粒界キャビティ面積率との関係を示したものである。クリープ疲労の寿命は保持時間とともに低下するが、粒界キャビティの発生量に対して敏感である。粒界キャビティの発生が非常に微量でも、クリープ疲労寿命は低下している。また、保持時間が長くなると粒界キャビティの発生量は急激に増加し、図中横軸のクリープ疲労寿命低下率は0.2付近である。このように、保持時間6, 60 minで観測されたわずかなキャビティ発生量が寿命低下に敏感な傾向と、600 minで観測されたようにキャビティ発生量は増加するが、寿命低下は0.2付近からゆるやかになる傾向と

が認められる。破損形態と比較してみると、0.3%, 6 min 保持では試験時間が約14000時間と長時間であるのに、キャビティは非常に少なく粒内破壊が主体であり、クリープ疲労の寿命低下はわずかである。60 min 保持になると定量的な割合は決定しにくい粒内破壊と粒界破壊の両方とも観察され、混合した破損形態となっている。キャビティ発生は非常に少ないが存在していることは認められる。さらに600 min 保持ではほとんど粒界破壊が主体となって、キャビティ発生も多くなっていく。これらの傾向は、従来のデータおよび本試験データとも同様な傾向にあった。寿命低下率がゼロとなる条件は疲労損傷がゼロとなり、通常クリープ試験の場合に相当する。20000時間クリープ試験におけるキャビティ面積率は0.053%であり、長々時間のクリープ疲労のキャビティ発生量は徐々にクリープで観測された量に近づくと考えられる。

このような様相から、破損形態とクリープ疲労の寿命低下率あるいは粒界キャビティの発生量との間にはお互い関係があるといえる。以上の結果をさらに詳細に分析するため、粒界キャビティの発生状態をFig. 5に示した。図には比較のため同温度で比較的長時間のクリープ破断したマイクロ写真も示した。ともに粒界キャビティが観測されるが、キャビティ発生量はクリープ疲労の方が少ない。そして粒界破損の仕方に相違がみられる。クリープの場合は、たくさんの粒界キャビティの連結によって破損するが、クリープ疲労の場合は、先に粒界キャビティが発生し、そこを起点とした微小き裂の進展を伴った破損と考えられる⁴⁾。このような破損の相違からFig. 4の結果を整理すれば、以下

Fig. 5. Cavity growth and microcrack propagation along grain boundaries under creep and creep-fatigue loadings.

のようにまとめられる。

(1) 粒界キャビティが発生すれば、そこを起点とした微小き裂進展により粒界破壊を伴い、クリープ疲労寿命は大きく低下する。

(2) 粒界キャビティ発生量がさらに多くなると、最終的にはキャビティの連結という長時間のクリープ破断に似た破損形態に近づくと考えられるが、クリープ疲労寿命低下をさらに大きく加速する傾向ではない。

したがって、粒界キャビティの発生と成長という観点からみれば、繰返し変形によりクリープ疲労寿命低下を促進させる領域と、キャビティの連結が主体でクリープ損傷のみに支配される領域とがある。本試験データのような 600 min の保持条件では、粒界キャビティの絶対量が増える領域であるが、キャビティの連結は観察されていない。低ひずみ範囲長時間保持試験でこの傾向が観察できると期待されるが、データを取得するのは困難なため温度加速試験等を考える必要がある。

3.3 弾性追従を伴うクリープ損傷評価

線形損傷則に基づく筆者らの提案している評価法は、クリープ損傷を評価する際、ひずみ保持中の応力緩和挙動を考慮して算出する。これまでに静的な応力緩和挙動の解析的な記述法はクリープひずみ曲線にひずみ硬化則を適用する方法が提案されており、精度よく記述できることが確認されている⁵⁾。そこで、本試験のように弾性追従を伴う場合の保持中の応力緩和挙動に対しても、従来手法による緩和解析法で精度よく記述できるかを調べた。

解析に先だって、実験の応力緩和挙動がどの程度弾性追従を伴っているのか、弾性追従係数 q を求めておく必要がある。Fig. 6 に示すように、 $1/2N_f$ 近傍のヒステリシスカーブから、保持中に明瞭に弾性追従によるひずみの増大がみられる。 q は保持部の応力変化 $(\sigma_{\max} - \sigma'_{\max})$ とひずみ増分 ϵ_{ef} を用いて、

Fig. 6. Stress-strain hysteresis loop at $1/2N_f$ cycle on displacement controlled creep-fatigue test.

Fig. 7. Comparison of cyclic stress relaxation curve during hold period at $1/2N_f$ cycle between observed and predicted curves.

$$q = 1 + E \cdot \epsilon_{ef} / (\sigma_{\max} - \sigma'_{\max})$$

E : 縦弾性係数

から求めた。得られた q は 3 ~ 10 と試験条件により異なる値であったため、解析ではそれぞれのヒステリシスカーブから得られた値を用いた。

このようにして求められた q を用いて、 $1/2N_f$ 近傍の保持中の応力緩和挙動を解析した結果を Fig. 7 に示す。同一条件の弾性追従を伴わないひずみ制御型の挙動 ($q=1$) と比較すると、弾性追従により緩和は硬くなっている様子がわかる。応力緩和の解析は、クリープひずみ速度を $\dot{\epsilon}/q$ で表し、弾性追従による緩和速度の低下を考慮した。また、クリープひずみ式はクリープ破断時間の関数となっており、クリープひずみ挙動のばらつきはクリープ破断時間のばらつきで表される。このばらつきを評価する時間係数を用いれば、確率 95% の上・下限界に対応する時間係数 $\alpha_c = 1/3, 3$ でクリープひずみのばらつきを包含できる⁵⁾。

応力緩和の評価結果は、時間係数 α_c に対して、クリープひずみのばらつき幅と同じファクタ 3 のバンドで包含できる。したがって、弾性追従を伴う場合の保持中の繰返し応力緩和挙動に関しても、クリープひずみ曲線にひずみ硬化則を適用して緩和解析する手法で評価できる。

保持中の応力緩和挙動の記述性は確認されたので、つぎに緩和開始応力の設定方法について検討した。従来より筆者らは、本網が繰返し硬化特性を示すことから、 $1/2N_f$ 近傍の最大応力を緩和開始応力として代表させており、保持のない疲労試験における $1/2N_f$ 近傍の繰返し応力-ひずみ関係を用いてきた。Fig. 8 に示したように、ひずみ制御試験のクリープ疲労の応力は、550°C において明瞭に保持軟化を示し、変位制御試験での応力は、明瞭な保持軟化傾向を示さず、ほぼ同ひずみ速度における保持のない疲労試験の最大応力と同程度であった。

Fig. 8. Cyclic stress-strain relationship at $1/2N_f$.

Fig. 9. Creep and fatigue damage diagram of SUS 304.

そこで、このような応力緩和挙動の相違および繰返し応力硬化の相違が観察されたので、クリープ疲労損傷値を算出し、 D 線図と比較してみた。得られた長時間クリープ疲労データを基にクリープおよび疲労の各損傷値を求めた結果を Fig. 9 に示す。図には従来のひずみ制御型試験で得られた損傷値（図中の白ぬきシンボル）も合わせて示した。クリープ損傷値 D_c は、試験で得られたひずみ保持中の応力緩和挙動データを用いて、各繰返しごとに詳細に $\sum t/t_r$ により累積した損傷値である。疲労損傷 D_f は、クリープ疲労寿命 N_{fCF} を平均疲労寿命 N_0 で除した値 (N_{fCF}/N_0) である。従来取得されてきたひずみ制御型のデータは、試験時間が長くても6カ月程度までということもあったが、クリープ損傷値はいずれも0.2以下であった。本試験で得られた長時間クリープ疲労データは、保持中に弾性追従が見込まれる試験であるため、特に550°Cに対してはクリープ損傷が従来より1桁大きい0.7程度まで増加した。従来本鋼に対して適用してきた

Fig. 10. Evaluation of creep damage for long term data.

(0.3-0.3) D 線図と比べると、今回取得された長時間クリープ疲労データは D 線図近傍に位置している。実機条件で変位制御に近いモードであることを考えれば、弾性追従を考慮した応力緩和解析に基づくクリープ損傷評価により、(0.3-0.3) を通る D 線図を用いて評価できる。

ひずみ制御試験のクリープ損傷値は小さく、 D 線図の内側にあるが、緩和開始応力の設定において保持なしの疲労試験における繰返し応力-ひずみ関係を用いれば、保持軟化分の割増しで D 線図の割込みを相殺することが見込まれる。変位制御試験の場合も、Fig. 8 の結果から保持のない疲労試験における繰返し応力-ひずみ関係を用いて緩和開始応力を決定できる。

上記の緩和開始応力を用いた応力緩和解析に、平均クリープ破断曲線を用いて、 $\sum t/t_r$ で計算した損傷値を N_f 倍した値と、試験で得られたひずみ保持中の応力緩和挙動データを用いて、各繰返しごとに詳細に $\sum t/t_r$ により累積した損傷値の比較を行った結果を Fig. 10 に示す。クリープ効果が優位な550°Cのクリープ損傷値の評価精度はファクタ3以内に十分入っている。450°C、500°Cの長時間クリープ疲労データも同バンドではほぼ整理できる。したがって、弾性追従によりクリープ効果が増加したデータに関するクリープ損傷の評価としては、本手法で十分精度よく評価できることが確認できた。

3.4 長時間クリープ疲労寿命評価

本研究で取得した長時間のクリープ疲労データと、これまでに実施してきた同一ヒートのデータとを合わせて、筆者らの提案している線形損傷則に基づくクリープ疲労評価法により寿命評価を行った。1サイクル当りの疲労損傷 d_f は、ひずみ保持のない疲労試験における平均疲労寿命 N_0 から $1/N_0$ により算出する。1サイクル当りのクリープ損傷 d_c は、保持中の応力緩和曲線を基に、クリープ破断曲線を用いて $\int dt/t_r$

により保持中時間積分される。この時の応力緩和挙動は、クリープひずみ曲線にひずみ硬化則を適用して記述し、緩和開始応力は、ひずみ保持のない場合の $1/2N_f$ 近傍の引張最大応力を表す繰返し応力-ひずみ関係を用いて算出する。そこでクリープ疲労寿命 N_{CF} は、両者の損傷和が D になると破損するという制限の基に、次式のようになる。

$$\left(\frac{1}{N_{f0}} + \int \frac{dt}{t_r} \right) \cdot N_{CF} = D \quad (1)$$

D : (0.3-0.3) の D 線図

従来の中・短時間データを本評価法で寿命予測すると、550°C で中心線上に、それより低温側で非安全側、高温側で安全側に予測されるというように温度により評価精度が異なる傾向をみせていた。Fig. 11 は温度に対して本クリープ疲労評価法による寿命予測を実測寿命との比で示したものである。今回の長時間データに対して評価法の温度依存性に有意な相違はみられない。従来懸念されていた比較的低温側のクリープ効果が小さいと予想される領域の非安全性はなくなり、長時間側で本評価法は妥当であることが確認できた。

Fig. 12 はクリープ疲労破損寿命に対して予測精度をみたものである。従来のひずみ制御試験によるデー

タはせいぜい6カ月程度のデータであるが、本研究により1年を超えるデータが評価された。本クリープ疲労評価法による予測精度は、長寿命領域まで従来の評価精度並に予測され、その精度はファクタ3以内で評価できる。

以上より、本鋼に対する本クリープ疲労評価法の外挿性に関しミクロ観察の結果から言えることは、長時間の粒界キャビティが多く発生するような領域で寿命が低下する方向にいくのなら、 D 線図に合う傾向であるため本評価法は妥当である。またそのような領域で寿命低下がほとんどみられなければ、本評価法は保守的に評価できるといえる。

4 結 言

SUS 304 に対し、線形損傷則に基づく筆者らの提案するクリープ疲労評価法の長時間データへの適用性を検討し、また破損形態を調べた結果以下のような結論を得た。

(1) 1万時間を超える長寿命領域クリープ疲労試験結果に関して、評価法は従来の評価バンドであるファクタ3以内の予測を与える。

(2) 弾性追従によってクリープ損傷が優位となったクリープ疲労試験結果は、0.3-0.3 の損傷ダイアグラムによって評価できる。

(3) クリープ効果が顕著でない温度領域 (450 ~ 500°C) においても、評価法は低ひずみ長時間側で高温側と同等の評価精度を与える。

(4) 粒界キャビティの発生量は保持時間による依存度が大きく、クリープ疲労の破損形態に強い影響を与えた。粒界キャビティの発生量が多くなると、クリープ疲労の破損形態は粒界キャビティを起点としたき裂進展による粒界破壊が生じる。クリープ疲労の寿命低下は、粒界キャビティの発生形態とその成長により影響を受ける。

(平成3年11月29日 日本材料学会第29回高温強度シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) K. Aoto, Y. Wada and R. Komine, ASME PVP, Vol. 123, 43 (1987).
- 2) H. Kawasaki, K. Aoto and Y. Wada, SMIRT 11, Trans. Vol. L, 271 (1991).
- 3) Y. Wada, Y. Kawakami and K. Aoto, ASME PVP, Vol. 123, 37 (1987).
- 4) F. Ueno, S. Kato, Y. Wada and S. Kano, ASME/JSME ICONE-1, 351 (1991).
- 5) K. Aoto, T. Koakutsu, Y. Wada and M. Hirano, Int. Conf. Creep, 495 (1986).
- 6) A. Yoshitake, Y. Wada and M. Hirano, Int. Conf. Creep, 441 (1986).

Fig. 11. Evaluation of creep-fatigue life prediction at several temperatures.

Fig. 12. Predictability of creep-fatigue life for long term data.