改良 9Cr-1Mo 鋼の繰返し応力クリープ、メカニカルラチェット挙動および振幅履歴依存性と統一形構成式の精度評価*

田中英一^{*1}, 山田 宏^{*1}

Cyclic Creep, Mechanical Ratchetting and Amplitude History Dependence of Modified 9Cr-1Mo Steel and Evaluation of Unified Constitutive Models

Eiichi TANAKA and Hiroshi YAMADA

The purpose of the present paper is to elucidate inelastic behavior of modified 9Cr-1Mo steel as a candidate material for the next-generation fast breeder reactor and to provide the information for the formulation of a unified constitutive model. For this purpose, cyclic creep, mechanical ratchetting and amplitude history dependence of cyclic hardening were first examined at 550°C. As a result, systematic cyclic creep and mechanical ratchetting behavior were observed under various loading conditions, and little amplitude history dependence was found. Then these results were simulated by three unified constitutive models, i. e. the Chaboche, Bodner-Partom and modified Chaboche models. The simulated results show that these models cannot describe the cyclic creep and mechanical ratchetting behavior with high accuracy, but succeed in describing the inelastic behavior of amplitude variation experiments.

Key Words: Inelasticity, Material Testing, Constitutive Equation, Modified 9Cr-1Mo Steel, Mechanical Ratchetting, Cyclic Creep, Amplitude History Dependence, Chaboche Model, Bodner-Partom Model, Modified Chaboche Model

1. 緒 言

次期大形高速増殖炉の蒸気発生器用候補材料として有力視されている改良 9Cr-1Mo 鋼に対し、その非弾性変形特性の把握と構成式のモデル化を行うための第 1 段階として、前報⁽¹⁾では一定温度 550°C での各種の基本的な非弾性試験と既存の 2 種類の統一形構成式、すなわち Chaboche モデルと Bodner-Partom モデルによるシミュレーションを実施した。その結果、一定ひずみ速度単調引張試験からひずみ速度依存性が顕著なこと、比例繰返し負荷のみならず非比例繰返し負荷のもとでも繰返し軟化を示すこと、一定応力のもとでのクリープ速度が応力レベルに極めて強く依存すること、さらに上述の二つのモデルがこれらの実験結果をよく表現すること、が確認された。

本報では、これまでのいずれの構成式によっても記述が著しく困難であった繰返し応力クリープ、メカニカルラチェットに対する試験の結果を報告する。また、構成式中の等方硬化変数に対する発展式の定式化に関して重要な情報を与える繰返し硬化の振幅履歴依存性を明らかにする目的から、単軸の振幅変動繰返し試験

も行う。つづいて前述の二つの統一形構成式モデルによるシミュレーションも行う。さらに Chaboche モデルについては、メカニカルラチェットの記述精度を改善するための改良方法が提案されている⁽²⁾ので、その方法に基づいてモデルの改良を試み、そのシミュレーションも実施する。

2. 改良 9Cr-1Mo 鋼の非弾性変形挙動

2・1 試験片と試験システム 試験片材料と試験片は、前報⁽¹⁾で使用したものと同まったく同一の、動力炉核燃料開発事業団から提供された改良 9Cr-1Mo 鋼の板材から製作された薄肉円管である。試験片への温度負荷および力学的負荷も、前報と同じ高周波加熱炉を備えた軸力-ねじり電気油圧サーボ式疲労試験機を用いた。

2・2 実験条件 一定温度 550°C にて、以下に示す繰返し応力クリープ試験、メカニカルラチェット試験、振幅変動を伴う完全両振単軸繰返し試験を実施した。

(1) 引張り-圧縮繰返し応力クリープ

応力速度を 50 MPa/s に選び、最大応力を 400 MPa の一定値、最小応力を -400, -300, -200, -100, 0, 100, 200, 300 MPa とする応力制御繰返し試験を実施

* 原稿受付 平成 5 年 3 月 29 日。

^{*1} 正員, 名古屋大学工学部 (〒464-01 名古屋市中種区不老町)。

して、応力振幅と平均応力が繰返し応力クリープ挙動に与える影響を観察した。また最大応力の大きさの違いによる変形挙動の相違をみる目的から、最大応力を 350 MPa、最小応力を 0, 100, 200 MPa とした試験も実施した。

応力値 400 MPa と 350 MPa は、550°C における一定ひずみ速度単調引張試験において弾性変形から非弾性変形に遷移する過渡状態の応力値に相当する。繰返し数の目標値は 500 回とした。

(2) メカニカルラチェット試験

定常引張応力およびねじりひずみ振幅を変化させる次の 2 種類の試験を実施した。最初の試験はねじりひずみ速度 $\dot{\gamma}/\sqrt{3}$ (ただし γ は工学的せん断ひずみ) を $5 \times 10^{-4}/s$ 、ねじりひずみ振幅 $\Delta(\gamma/\sqrt{3})/2$ を 0.4% とし、定常引張応力に 50 MPa と 100 MPa の 2 種類を選ぶ試験であり、2 番めは定常引張応力を 50 MPa、ねじりひずみ速度 $\dot{\gamma}/\sqrt{3}$ を $5 \times 10^{-4}/s$ とし、ねじりひずみ振幅 $\Delta(\gamma/\sqrt{3})/2$ を 0.3% と 0.5% とする試験である。

(3) 引張り-圧縮完全両振振幅変動試験

まず、基本的なひずみ振幅 $\Delta\epsilon/2$ として 0.3, 0.5, 0.7 あるいは 0.75% を選び、これらの順序を適宜組合せて、振幅変動の繰返し軟化挙動に及ぼす影響を系統的に調べた。表 1 にひずみ振幅の組合せを示す。試験

表 1 振幅変動試験のひずみ振幅の組合せ

Test	$\Delta\epsilon/2$ (%)		
	1st	2nd	3rd
A	0.3	0.5	0.7
B	0.7	0.5	0.3
C	0.3	0.75	0.3
D	0.7	0.3	0.7
E	0.5	—	—

A はひずみ振幅を階段状に増加させた場合で、先行する小さなひずみ振幅の影響を調べる。試験 B では逆にひずみ振幅を階段状に減少させる場合で、先行する大きなひずみ振幅の影響を調べる。次に試験 C では一定ひずみ振幅繰返し変形の途中の大きなひずみ振幅の影響を、試験 D は逆に繰返し変形の途中の小さな振幅の影響を調べる。最後に試験 E は一定ひずみ振幅 0.5% の繰返しであり、履歴がある場合の試験 A, B の第 2 段階との比較の基準となるものである。これらの試験はすべてひずみ制御で行い、ひずみ速度は $5 \times 10^{-4}/s$ とした。

2.3 実験結果 最初に、引張り-圧縮繰返し応力クリープ試験に対する応力-ひずみ関係を、一例として最大応力 $\sigma_{\max}=400$ MPa、最小応力 $\sigma_{\min}=100$ MPa にて 500 回繰返しした場合について図 1 に示す。同図には後述のモデルによるシミュレーション結果も示しており、一見して記述精度が十分でないことがわかるが、詳細はのちほど検討する。まず、図から、繰返し応力クリープの量を、その他の最小応力条件の場合も含めてより定量的に検討するため、各サイクルでの平均ひずみ ϵ_{mean} (最大ひずみと最小ひずみとの平均値) とサイクル数 N の関係を図 2 に示す。この図から、最小応力値が負の場合には、その絶対値が大きいにときに大きなひずみを生じており、-100 MPa のときに最小となる。最小応力値が正のときには、 $\sigma_{\min}=100$ MPa と 200 MPa の場合にほとんど一致するものの、300 MPa のときにより大きくなり、やはり絶対値が大きいにときに大きなひずみが生じている。これは時間非依存塑性の場合のいわゆる繰返し応力クリープ現象に、高温下にて平均応力が大きいほど顕著になる一定応力下のクリープの効果が重ね合わさって生じるためである。最大応力 $\sigma_{\max}$ が 350 MPa の場合の繰返し応力クリープひず

図 1 繰返し応力クリープ試験における応力-ひずみ関係

みとサイクル数 N の関係を図 3 に示す。最大応力が 400 MPa の場合と比べて、同じ最小応力値に対して生じるひずみ量がかなり小さいことがわかる。

次に、メカニカルラチェット試験から得られた軸方向ひずみ ε とねじりひずみ $\gamma/\sqrt{3}$ の関係を、一例として定常引張応力が 100 MPa、ねじりひずみ振幅 $\Delta(\gamma/\sqrt{3})/2$ が 0.4% の場合についてシミュレーション結果とともに図 4 に示す。シミュレーション結果は実験結果と著しく異なるが、その詳細はのちほど検討する。まず図から、ねじりひずみが繰返されるに従って、定常引張応力に対応する軸方向ひずみが累積していくことがわかる。図 5 は累積ひずみ量を定量的に示すため、ねじりひずみが増加から減少に転ずる点での軸方向ひずみ値と繰返し数との関係を、すべての実験条件に対して表示したものである。軸方向定常応力とねじりひずみ振幅が増加するに従って軸方向ひずみの累積が顕著になっている。

最後に、振幅変動試験の結果について考察する。まずひずみ振幅が順次増加する試験 A、減少する試験

B、ならびに一定振幅 0.5% の試験 E に対する応力振幅と累積非弾性ひずみ (Mises 形の相当非弾性ひずみ速度の時間積分値) の関係を図 6 に示す。各試験開始直後の結果はそれぞれ処女材に 0.3, 0.5, 0.7% の単軸繰返しを与えた場合に相当するが、明らかに応力振幅のひずみ振幅依存性が認められる。試験 A, B の第 2 段階ならびに試験 E はいずれもひずみ振幅 0.5% の結果であるが、応力振幅値はほとんど一致している ($p=1.5$ 近傍)。これから、先行サイクルはその振幅の大小にかかわらず、後続サイクルの応力振幅値に影響を与えていないといえる。これをより詳細に検討するため、累積非弾性ひずみ値 $p=1.5$ での各試験の応力-ひずみヒステリシスループを図 7 に重ね合わせて示す。図からわかるように、過去に大きな振幅履歴をもつ場合にややループ幅が広がるものの、3 本のヒステリシスループはほぼ一致しているといえる。以上のことから、この材料には振幅履歴がほとんど残らないことが推定できる。

図 2 繰返し応力クリープ試験における平均ひずみと繰返し数の関係(最大応力 400 MPa)

図 3 繰返し応力クリープ試験における平均ひずみと繰返し数の関係(最大応力 350 MPa)

図 4 メカニカルラチェット試験における応力とひずみの関係

3. 統一形構成式による シミュレーション

前報⁽¹⁾と同様、改良 9Cr-1Mo 鋼の非弾性挙動に対する既存の統一形構成式の予測精度を検討するため、Chaboche モデル⁽³⁾⁽⁴⁾と Bodner-Partom モデル⁽⁵⁾による実験結果のシミュレーションを行った。また Chaboche モデルについては、メカニカルラチェットの記述精度を改善するための方法が提案されている⁽²⁾ので、それを参考にして修正モデルの定式化を試みた。Chaboche モデルおよび Bodner-Partom モデルの具体形ならびに材料定数はすでに前報⁽¹⁾にて示したので、以下では修正 Chaboche モデルの具体形を最初に示し、つづいてこれらのモデルによるシミュレーション結果を述べる。

3.1 修正 Chaboche モデルの概要 修正 Chaboche モデルは Chaboche モデルにおける移動硬化変数に

図 5 メカニカルラチェット試験における軸方向ひずみと繰返し数の関係

図 6 振幅変動試験における応力振幅と累積非弾性ひずみの関係

対する発展式を修正したものである。したがって、全ひずみ速度が弾性部分と非弾性部分の和に分解でき、弾性ひずみ速度は等方弾性体に対する Hooke の法則に従うこと、そして非弾性ひずみ速度 $\dot{P}$ が

$$\dot{P} = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{S - X}{J(S - X)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{p} = \left\langle \frac{J(S - X) - R - k}{K} \right\rangle^n \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$J(S - X) = \sqrt{\frac{3}{2}} (S - X)^T (S - X) \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表されることは同じである。 S と X は偏差応力テンソルと移動硬化変数、 $\dot{p}$ と R は非弾性ひずみ速度の大きさと等方硬化変数、 k は初期弾性範囲の大きさ、 K 、 n は材料定数である。テンソルの右肩の指標 T はテンソルの転置を示し、記号 $\langle \rangle$ はマコーレ括弧弧であって、 $u > 0$ のとき $\langle u \rangle = u$ 、 $u \leq 0$ のとき $\langle u \rangle = 0$ となる。

移動硬化変数 X に対する発展式は

$$\dot{X} = \dot{X}_1 + \dot{X}_2 + \dot{X}_3 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\dot{X}_1 = c_1 \left(\frac{2}{3} a_1 \dot{P} - X_1 \dot{p} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\dot{X}_2 = c_2 \left(\frac{2}{3} a_2 \dot{P} - X_2 \dot{p} \right) - \gamma J(X_2)^{m-1} X_2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\dot{X}_3 = c_3 \left\{ \frac{2}{3} a_3 \dot{P} - (X_3 - Y) \dot{p} \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\dot{Y} = \frac{1}{K_Y} (C_Y X_3 - Y) J(\dot{X}_3) \quad \dots\dots\dots (8)$$

のように修正される。ここで c_1 、 c_2 、 c_3 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 γ 、 m 、 K_Y 、 C_Y は材料定数である。移動硬化変数の基準位置を応力零からシフトさせる変数 X_3 と Y の導入ならびにそれらの発展式(7)と(8)が修正部分である。

図 7 振幅変動履歴が応力-ひずみヒステリシスループ形状に及ぼす影響

式(8)において $C_r=1$ のとき、この修正は Rous-selier のそれと一致し⁽²⁾、ラチェット変形はある程度生じたのち停止する。しかし実験結果においては停止傾向はみられなかったため、 $C_r \neq 1$ なる材料定数をさらに導入したものである。

最後に、等方硬化変数 R に対する発展式には前報⁽¹⁾で示した Chaboche モデルと同じ式

$$\dot{R} = b(Q - R)\dot{\gamma}, R(0) = 0 \dots\dots\dots (9)$$

を採用した。ここで、 b 、 Q は材料定数である。

このモデルの材料定数を同定するには、まず式(7)、(8)を無視し、前報で述べた方法に従って X_3 、 Y 関連の a_3 、 c_3 、 K_r 、 C_r 以外の材料定数を決定する。その後、メカニカルラチェット試験、一定ひずみ速度単調引張試験から X_3 の硬化の寄与分を考慮して a_3 、 c_3 、 K_r 、 C_r を同定し、また前に定めた材料定数を調整する。Chaboche モデルにおいては移動硬化、等方硬化、

粘性による硬化をそれぞれ独立に扱え、材料定数間の連成が小さいため、定数の決定が困難になることはない。このようにして定めた材料定数を以下に示す。

$$\begin{aligned} n &= 7.15, K = 484 \text{ MPa/s}^{(1/7.15)} \\ a_1 &= 35 \text{ MPa}, a_2 = 120 \text{ MPa}, a_3 = 20.5 \text{ MPa} \\ C_1 &= 300, C_2 = 1200, C_3 = 4\,000, C_r = 0.993 \\ K_r &= 21.2 \text{ MPa}, Q = -80 \text{ MPa}, k = 80 \text{ MPa} \\ b &= 2.5, \gamma = 2.06 \times 10^{-18} (\text{MPa})^{-7.7} \cdot \text{s}^{-1}, m = 8.7 \end{aligned} \dots\dots\dots (10)$$

3.2 シミュレーション結果とその検討 まず、繰返し応力クリープ試験に対するシミュレーション結果を、一例として最大応力が 400 MPa の場合について、図 8 から図 10 に示す。どのモデルも図 2 に示した実験結果よりもかなり大きめのひずみを予測している。特に Chaboche モデルと Bodner-Partom モデルは、最小応力が 0 あるいは -100 MPa 以上の場合に

図 8 Chaboche モデルによる繰返し応力クリープ試験のシミュレーション結果

図 10 修正 Chaboche モデルによる繰返し応力クリープ試験のシミュレーション結果

図 9 Bodner-Partom モデルによる繰返し応力クリープ試験のシミュレーション結果

図 11 メカニカルラチェット試験に対するシミュレーション結果

対する予測値がほとんど一致しており、実験結果と定性的傾向がやや異なる。しかし Bodner-Partom モデルのほうが低めの予測値を与え、実験結果に近いようである。修正 Chaboche モデルの結果は Chaboche モデルの結果と比べれば改善されているが、最小応力が正の場合のクリープひずみの生じ方が実験結果とは異なる。すなわち、絶対値が大きいほど小さなクリープひずみを与えている。いずれにせよ、メカニカルラチェットの記述改善を目的としてなされた修正は、繰返し応力クリープに対してはそれほど有効ではないといえる。

次に、メカニカルラチェット試験に対するシミュレーション結果を検討する。一例として定常引張応力 100 MPa、ねじり振幅 0.4% の結果を図 11 に示す。Chaboche モデルと Bodner-Partom モデルはラチェットひずみを実験結果よりも大幅に大きく見積もっている。これに対し修正 Chaboche モデルは、最初は実験結果よりもやや大きく、途中からは小さく見積もる。このほかの実験条件に対してもこれらの傾向は変わらず、すなわち Bodner-Partom モデルはつねに最も大きなラチェットひずみを与え、修正 Chaboche モデルは最初の段階でラチェットひずみが急激に大きくなる。いずれにせよ、どのモデルの予測精度も十分ではない。

最後に、振幅変動試験に対するシミュレーション結果について検討する。実験 C から得られた応力振幅と累積非弾性ひずみの関係を図 12 に示す。図からわかるように、Chaboche モデルと修正 Chaboche モデルの結果はほぼ一致しており、実験結果をほぼ記述していると言える。このように、等方硬化変数に対する発展式に振幅履歴依存性を特別に考慮しなくても実験結果をほぼ記述できたのは、2 章で述べたようにこの材料には振幅履歴依存性がほとんど観察されなかったためと考えられる。Bodner-Partom モデルに関しては、モデルが繰返し軟化そのものをやや大きめに見積もるため、実験結果との間に若干の差が生じている。

以上の結果を総合的にみると、前報⁽¹⁾でみたように、単調負荷、クリープ、完全両振り繰返し負荷、ひずみ制御の非対称繰返し負荷、ひずみ空間の原点を中心とする円形サイクル等に関する限り上述のいずれのモデルもほぼ妥当な予測を与えるが、繰返し応力クリープ、メカニカルラチェット等の応力制御の非対称負荷条件に対する予測精度はいずれのモデルも十分ではない。しかし、Chaboche モデルの理論的枠組は柔軟であり、新しい発展式を組入れやすい構造をもつ。したがって、このような不合理な予測の原因となった移動

図 12 振幅変動試験に対するシミュレーション結果

硬化変数に対する発展式を置き換えるのも極めて容易である。その意味で Chaboche モデルは今後の構成式開発の基礎にしようモデルであると言える。

4. 結 言

前報に引続き本報では、次期高速増殖炉用構造材料としての改良 9Cr-1Mo 鋼に対し、繰返し応力クリープ、メカニカルラチェット、振幅履歴依存性を明らかにする実験と、既存の代表的統一形構成式の Chaboche モデルと Bodner-Partom モデルならびに修正 Chaboche モデルによるシミュレーションを実施した。その結果、この材料においては振幅履歴依存性がほとんどないこと、いずれのモデルによっても繰返し応力クリープとメカニカルラチェットの記述は困難であることなどが明らかとなった。次報では、改良 9Cr-1Mo 鋼の温度ならびに温度履歴依存性を報告する予定である。

本研究を実施するに際しご援助をいただいた動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センターの岩田耕司氏並びに青砥紀身氏に深く感謝する。また適切なご検討をいただいた名古屋大学工学部の村上澄男教授に感謝する。

文 献

- (1) 田中・水野, 改良 9Cr-1Mo 鋼の高温一定温度基本的荷重条件下での非弾性挙動と既存の 2 種類の統一形構成式の精度評価, 機論, 59-565, A (1993), 2196.
- (2) Chaboche, J. L. and Nouaihas, D., Constitutive Modeling of Ratchetting Effects-Part 2: Possibilities of Some Additional Kinematic Rules, *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol.*, 111-4 (1989), 409.
- (3) Chaboche, J. L. and Rousselier, G., On the Plastic and Viscoplastic Constitutive Equations-Part 1: Rules Development With Internal Variable Concept, *Trans. ASME, J. Press. Vessel Technol.*, 105-2 (1983), 153.

- (4) Chaboche, J. L., Constitutive Equations for Cyclic Plasticity and Cyclic Viscoplasticity, *Int. J. Plasticity*, 5 (1989), 247.
- (5) Bodner, S. R. (Miller, A. K., 編), *Unified Constitutive Equations for Creep and Plasticity*, (1987), 273, Elsevier Applied Science.
-