**2¹/₄ Cr-1Mo 鋼のクリープ・疲労相互作用における
応力-ひずみ応答の解析***浅 山 泰*¹, 程 時 珍*²
橘 幸 男*³, 朝 田 泰 英*⁴**An Analysis of Stress-Strain Response in the Creep-Fatigue Behavior
of 2¹/₄ Cr-1 Mo Steel**Tai ASAYAMA, Shi-Zhen CHENG,
Yukio TACHIBANA, and Yasuhide ASADA

A stress-strain response of 2 1/4 Cr-1 Mo steel at 550°C was investigated, based on the creep-fatigue test results obtained by the authors, as shown in the previous report. The following observations were made. The stress-strain response of this material is not affected by a test environment but by loading conditions. Internal stresses were determined from an analysis of unloading curves. The internal stress consists of a back stress and a drag stress. A drag stress corresponds to the radius of an elastic core. The overstress was also determined phenomenologically. The value of the overstress of this material does not depend either on the inelastic strain rate or the strain range thus far as investigated. Back stress softens as the material softens, but the overstress and drag stress are almost constant until failure. The above observations are compared with those for 304 steel.

Key Words: Fatigue, Creep-fatigue, Internal Stress, Back Stress, Drag Stress, Overstress

1. 緒 言

著者らは、SUS 304 鋼について 650°C の高真空中 (0.1 μPa, 100 μPa) と大気中でクリープ・疲労試験を行い、環境効果と純クリープ・疲労相互作用を分離評価するための基礎データの収集に努めてきた⁽¹⁾⁽²⁾。さらに、クリープ・疲労試験において得られた応力-ひずみ応答を解析することにより、試験結果から内部応力の値を求め、これを用いて有効応力の値を決定し、これに基づいて損傷パラメータ (時間非依存および時間依存) を用いて記述される寿命評価法を開発し、これにより妥当な寿命の予測が可能であることを示した⁽³⁾。

その後、著者らは SUS 304 鋼に対して開発された損傷評価法が他の材料にも適用し得るか否かを検討することを目的として 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼について 550°C の 0.1 μPa, 100 μPa 真空中、大気中で SUS 304 鋼と同様のクリープ・疲労試験を行った。結果は前報⁽⁴⁾に示したとおりである。本報では、2 1/4 Cr-1 Mo 鋼の試験結

果に損傷評価法を適用するための前段階として、試験により得られた応力-ひずみ応答を解析することにより、内部応力、さらに有効応力の値を決定した結果、および、その過程で得られた知見を SUS 304 鋼の場合と比較、検討した結果について述べる。ここで、内部応力とは、材料が非弾性変形に抵抗する強さを代表する応力成分であり、有効応力は非弾性変形に直接寄与する応力成分であると考えらる。

2. クリープ・疲労試験の方法と結果

2.1 クリープ・疲労試験の方法 供試材は 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼の焼ならし、焼もどし材である。試験温度は 550°C とし、二種の真空中 (0.1 μPa, 100 μPa) と大気中でひずみ制御の引張圧縮クリープ・疲労試験を行った。試験方法の詳細については別報⁽¹⁾⁽⁴⁾を参照されたい。

2.2 クリープ・疲労試験の結果 試験結果を図 1 に示す。図 1 は横軸に寿命 (破断時の繰返し数) を、縦軸に全ひずみ範囲をとって、三種の環境における試験結果を重ねてプロットしたものである。本論文では主に 0.1 μPa 真空中の試験により得られたデータを用いるので、この環境における試験結果の既要を述べる。試験結果の詳細な考察については前報⁽⁴⁾を参照された

* 昭和 62 年 10 月 31 日 山梨地方講演会において講演、原稿受付 昭和 62 年 5 月 8 日。

*¹ 正員、東京大学大学院 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)。

*² 中国化学工業部化工機械研究院 (中華人民共和國蘭州市西園中路 4 号)。

*³ 学生員、東京大学大学院。

*⁴ 正員、東京大学工学部。

い。

0.1 μPa 真空中では環境効果はほぼ完全に排除されていると考えてよい。まず FF 波(以後簡単のため、波形を記号により示す。F, S, S₂, S₃ はそれぞれ 1×10^{-3} , 1×10^{-4} , 1×10^{-5} , $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ のひずみ速度, H_T/H_C は引張り/圧縮ひずみ保持時間(600 s)を表すものとし、負荷の順序に記号を並べて波形を示す)と SS 波は同程度の寿命を示し、0.1 μPa 真空中ではひずみ速度効果は消滅すると考えてよい。また、これら二種の対称三角波の寿命がこの温度、環境では最長となる。しかし波形効果、ひずみ保持効果は残存し、非対称三角波、ひずみ保持波は対称三角波に対して寿命低下を生じる。寿命は長いほうから順に対称三角波 > FS 波 $\approx$ 引張りひずみ保持波 $\approx$ 圧縮ひずみ保持波 > SF 波 > S₂F 波となる。この結果は FS 波、圧縮ひずみ保持波で寿命低下が生じた点が大きく異なるが、他の傾向は SUS 304 鋼の場合と一致している。すなわち、FS 波、圧縮ひずみ保持波を除いて、引張移行行程(ひずみ保持時間を含む)に要する時間が圧縮移行行程に要する時間を越える波形においてのみ寿命低下が生じるといえる。FS 波、圧縮ひずみ保持波の寿命が低下したことは、これらの波形のみで生じた正の平均応力が原因ではないかと考えている。この点については後述する(3・2 節参照)。

3. 応力-ひずみ応答の解析

3・1 応力-ひずみ応答の環境依存性 本研究で用いた 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼の焼ならし・焼もどし材は典型的な繰返しひずみ軟化挙動を示す。図 2 にその例を示す。図 2 は FF 波、ひずみ範囲 0.01 の場合の最大/最小応力のひずみ繰返し数に対する変化を表したものである。図 2 には、この材料の応力-ひずみ応答の環境依存性を検討するために三種の環境で得られたデータを重ねてプロットしてある。結果は大変興味深く、破断寿命が環境によって変化しても、繰返しひずみ軟化の

挙動はすべての環境で一致している。この傾向は、他の波形、ひずみ範囲についても、試験条件が同一であれば全く同様に観察された。さらに、応力-ひずみヒステリシス曲線も、環境を除く試験条件が同一であれば、同じ繰返し数のものどうしが一致する。これらの事実は、2 1/4 Cr-1 Mo 鋼の応力-ひずみ応答は試験環境には依存せず、力学的条件、すなわちひずみ速度、ひずみ波形、ひずみ範囲だけで決定されることを示していると判断してよい。この知見に基づき、以後の解析は 0.1 μPa 真空中の試験結果を用いて進めるが、その過程で用いられた手法や導かれた知見は、そのまま他の環境で得られた試験結果にも適用できると考えてよい。

3・2 最大/最小応力とひずみ範囲の関係 0.1 Pa 真空中の試験により得られた最大/最小応力とひずみ範囲の関係を図 3 に示す。最大/最小応力の値はすべて半寿命付近の値である。最大/最小応力の大きさはひずみ速度の低下とともに小さくなることがわかる。また、最大/最小応力はそれぞれ圧縮/引張移行行程のひずみ速度には依存しないようである。その結果、平均応力の値に注目すると、FS 波、圧縮ひずみ保持波でのみ正の平均応力が生じていることは興味深い。波形との関連を考えると、引張移行行程に要する時間が圧縮移

図 2 三種の環境における最大/最小応力の繰返しひずみに伴う変化

図 1 クリープ・疲労試験の結果

図 3 最大/最小応力とひずみ範囲の関係

行程に要する時間と等しいか長い場合には平均応力は零または負となり、逆の場合には正となる、ともいえる。

3.3 除荷曲線の検討 著者らは SUS 304 鋼の研究において、実験により得られた応力-ひずみヒステリシス曲線の除荷部分（以後除荷曲線と称す）の形状を解析することにより、内部応力の値を決定し、その結果を用いて有効応力の値を決定した⁽³⁾。本研究では 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼について除荷曲線の形状の検討を行い、内部応力を決定した。

2 1/4 Cr-1 Mo 鋼の除荷曲線の例を図 4 に示す。図 4 は 0.1 μ Pa 真空中の FF 波の引張ピークからの除荷曲線をひずみ範囲の異なる 7 本について横軸に非弾性ひずみ、縦軸に応力をとってプロットしたものである。いずれの除荷曲線も半寿命時のもので図中の点はサンプリング・ポイントに対応している。この図より、2 1/4 Cr-1 Mo 鋼の除荷曲線の特徴的な形状を讀取ることができる。まず、除荷開始直後は、非弾性ひずみは作用応力の方向に増加し続ける。ただし増加量はごくわずかである。次に非弾性ひずみが一定のまま応力が低下する領域がある。この部分は応力-非弾性ひずみ線図では横軸に垂直な直線として、応力-全ひずみ線図では傾きが弾性係数に等しい直線として現れる。図 4 にはこの領域を実線で示してある。さらに応力が低下すると、非弾性ひずみは作用応力の変化方向に進行し始める。

図 4 は引張ピークからの除荷曲線であるが、圧縮ピークからの除荷曲線も全く同様の傾向を示し、両者はほぼ対称であった。さらに、FF 波以外の波形においても、すべての除荷曲線は FF 波と同様の傾向を示していた。ただし対称三角波以外の波形では一般に引張ピーク側と圧縮ピーク側で対称ではない。

SUS 304 鋼の除荷曲線には上述の非弾性ひずみ一定の領域は存在せず、2 1/4 Cr-1 Mo 鋼の非弾性ひずみ一定の領域が無限に小さくなった場合に相当してい

るといえる。

著者らは、この非弾性ひずみ一定の領域は、その内部では材料が弾性挙動を示す、弾性領域と呼ぶことにした。この弾性領域はひずみ範囲の増大とともに大きくなる傾向がある（図 4）。さらに弾性領域の大きさの半分に当たる応力値を抗応力と定義した。また、弾性領域の中心における応力値を背応力と定義した。これら二種の応力はいずれも内部応力であると考えることができる。すなわち、2 1/4 Cr-1 Mo 鋼には抗応力と背応力の二種の内部応力が存在すると仮定した。2 1/4 Cr-1 Mo 鋼の応力-ひずみヒステリシス曲線の概念図を図 5 に示す。

3.4 背効応力の決定 著者らは、前節で決定した内部応力の値を用いて、次式により有効応力 (Overstress) を定義した。

$$\sigma_e = \sigma - (R + D) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで σ_e は有効応力、 σ は作用応力、 R は背応力、 D は抗応力を示す。内部応力の値が既知であれば、式 (1) により、有効応力の値を求めることができる。ただし、除荷曲線の解析から内部応力の値を求めることができるのは、引張り/圧縮ピークの 2 点のみであるので、実験結果から直接有効応力の値を求めることができるのもそれら二点に限られることに注意する必要がある。引張り/圧縮ピークで式 (1) を用いると、次のようになる。

$$\sigma_{e\text{peak}} = \sigma_{\text{peak}} - (R + D) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし $\sigma_{e\text{peak}}$ は引張り/圧縮ピークにおける有効応力の測定値、 σ_{peak} は最大/最小応力である。この方法では除荷曲線の形状の解析により有効応力を決定しているので、有効応力の測定値が除荷時のひずみ速度に依存する可能性がある。そこで、除荷時のひずみ速度が有効応力の測定値に及ぼす影響を調べるために、横軸に除荷ひずみ速度、縦軸に有効応力の測定値をとって整理した結果を図 6 に示す。この場合負荷ひずみ速度はすべて $\dot{\epsilon}_t = 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ に統一してある。図 6 より、ひずみ速度の低下とともに有効応力の測定値は顕著に

図 4 除荷曲線の例

図 5 応力-ひずみヒステリシス曲線の概念図

増大することがわかる。これは、除荷ひずみ速度が遅い場合には除荷中に生じる内部応力（抗応力と背応力の和）の回復が顕著になるためであると考えることができる。この傾向は SUS 304 鋼の場合と同様である。したがって負荷反転の瞬間の真の有効応力の値を求めるためには、内部応力の回復が無視できる程度に速いひずみ速度で除荷しなければならない。具体的には、図 6 において有効応力が一定値に収束するときのひずみ速度で除荷しなければならないことになる。このひずみ速度は、図 6 より、 $\dot{\epsilon}_t = 5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 程度であることが予想される。しかし本研究では、除荷ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_t = 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ で求めた有効応力の測定値を負荷反転の瞬間における真の有効応力の値であると仮定しても誤差は小さいと考え、以後この仮定に基づいて解析を進めた。

3.5 負荷反転時における非弾性ひずみ速度と有効応力の関係 著者らは、後の損傷計算に用いるために、負荷反転時の非弾性ひずみ速度と有効応力の関係を実験により決定した。この関係は SUS 304 鋼についても求められており⁽³⁾、今回この関係を求めるために用いた方法も、SUS 304 鋼の場合と同じである。すなわち、3.4 節より、除荷ひずみ速度が $\dot{\epsilon}_t = 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ であれば、実験により得られた有効応力の測定値を負荷反転の瞬間の真の有効応力の値であると考えことにする。ここで、除荷時のひずみ速度を $\dot{\epsilon}_t = 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ に固定し、いくつかの値の負荷ひずみ速度について有効応力の値を実験により求めた。本研究で用いた負荷ひずみ速度は $\dot{\epsilon}_t = 1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ である。各負荷ひずみ速度につき、二、三のひずみ範囲を用いた。このようにして得られた、有効応力と負荷ひずみ速度、ひずみ範囲との関係を図 7 に示す。図 7 より明らかなように、2 1/4 Cr-1 Mo 鋼の有効応力は、負荷時の非弾性ひずみ速度にもひずみ範囲にも依存しない一定値をとることがわかる。これは、有効応力の値がひずみ速度依存性（ $\dot{\epsilon}_{in} = 1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 付近から低下）

さらにすべてのひずみ速度領域において顕著なひずみ範囲依存性を示した SUS 304 鋼とは非常に異なる点である。

3.6 任意時刻における有効応力と非弾性ひずみ速度の関係 図 7 に示した非弾性ひずみ速度と有効応力の関係は、すでに述べたとおり、負荷反転時（引張ピーク）において得られたものであるが、この関係が負荷中のピーク以外の任意の点について成立すると仮定し、さらに、実験を行ったひずみ速度領域以外のひずみ速度についてもこの関係がそのまま成立すると仮定すると、負荷中の任意の瞬間の有効応力の値を予測することができる。図 5 は予測結果を概念的に示してある。ただし図 5 では弾性領域の終点で作用応力と内部応力が一致するように修正を加えてある。実際には非弾性ひずみ速度を $\dot{\epsilon}_{in} = 1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ よりもさらに低下させると、有効応力の値も低下し、零に漸近することが予想される。

4. 考 察

4.1 有効応力、抗応力、背応力の繰返しひずみに伴う変動 3 章では主に半寿命時の応力-ひずみ応答を解析したが、本節では、有効応力、抗応力、背応力の繰返しひずみに伴う変動を検討した。結果を図 8 に示す。図 8 は FF 波、ひずみ範囲 0.01 を例にとって横軸に繰返し数、縦軸に最大/最小応力、有効応力、抗応力、背応力をとったものである。各応力の値は特に繰返しの初期においてばらついているものの、次の傾向を読むことができる。すなわち、有効応力、抗応力は試験開始から破断に至るまでほぼ一定値をとる。これに対し背応力は徐々に軟化し、軟化量は最大/最小応力の軟化量とほぼ等しい。この傾向は他の波形、ひずみ範囲の試験についても同様に観察された。この結果より、2 1/4 Cr-1 Mo 鋼の繰返しひずみ軟化挙動は背応力の軟化挙動により支配されていると考えることができる。有効応力は破断までほぼ一定値を保ち、この材料

図 6 除荷ひずみ速度と有効応力の測定値の関係

図 7 非弾性ひずみ速度と有効応力の関係

では有効応力は非弾性ひずみ速度、ひずみ範囲に加えて、繰返し数にも依存しないことがわかる。このように、有効応力は破断まで一定値を保ち、背応力が繰返しひずみ軟化を支配するという傾向は、抗応力が存在しない SUS 304 鋼でも同様であった。ただし SUS 304 鋼の場合は繰返しひずみ硬化である。

4.2 抗応力、背応力のひずみ速度依存性 本節では、背応力、抗応力のひずみ速度依存性について検討する。図 9 に引張ピークにおける抗応力、背応力と非弾性ひずみ速度の関係を示す。図 9 には最大応力の値も同時に示してある。この図より、抗応力は有効応力と同様に、ひずみ速度には依存しないほぼ一定値をとるが、背応力は、ほぼ最大応力と同程度のひずみ速度依存性を示していると判断できる。従って 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼では、背応力のひずみ速度依存性が最大応力のひずみ速度依存性を支配していると考えることができる。なお、図 9 に示した最大応力、背応力の値は半寿命付近における値であるが、 $\dot{\epsilon}_{in}=10^{-6} \text{ s}^{-1}$ と $\dot{\epsilon}_{in}=10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の一部については試験の所要時間が非常長くなるため半寿命付近まで試験を行っておらず、図 9 には繰返し数に依存しない抗応力の値のみを示した。

4.3 変形挙動の分離 3.6 節で非弾性ひずみ速度と有効応力の関係を求める際に負荷反転時における両者の関係が任意の瞬間に成立すると仮定したが、この仮定の妥当性について若干の考察を行う。

応力-ひずみヒステリシス曲線を除荷開始点を原点として両対数図上にプロットすると、折れ曲がった 2 本の直線で近似できることは、いくつかの材料について指摘されている⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。今回解析対象とした 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼でも同様の傾向が見られた。結果の例を FF 波の引張移行行程について図 10 に示す。図 10 の横軸、縦軸はそれぞれ、弾性領域の終点を原点にとった非弾性ひずみ、応力である。従来の研究では除荷開始点を原点にとっているが、本研究では 3.3 節の解析に基づ

き、非弾性変形が負荷方向に進行し始める点として弾性領域の終点を原点にとったものである。図 10 より、2 1/4 Cr-1 Mo 鋼でも応力-ひずみ応答をひずみ硬化指数の異なる二領域に分離し得ることがわかる。

Moreen⁽⁵⁾はこの現象を転位論的立場から考察し、二つの領域におけるひずみ硬化指数が異なるのはそれぞれの領域における変形機構が異なるためであるとしている。本研究では転位論的に詳細な考察は行っていないが、もし応力-ひずみヒステリシス曲線が変形機構の異なる二領域から成っているとすれば、それぞれの領域で非弾性ひずみ速度と有効応力の関係も異なっている可能性があると考えことは不自然ではない。したがって負荷反転時における非弾性ひずみ速度と有効応力の関係が任意の瞬間に成立すると仮定することには問題がある可能性もある。この点については今後さらに検討する必要があると著者らは考える。

5. 結 言

本研究では 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼の 550°C におけるクリープ・疲労試験により得られた応力-ひずみ応答を解析することにより以下の知見を得た。

- (1) 2 1/4 Cr-1 Mo 鋼の 550°C における応力-ひずみ応答は環境に依存しない。
- (2) この材料の作用応力は、内部応力と有効応力

図 9 非弾性ひずみ速度と抗応力、背応力の関係

図 8 有効応力、抗応力、背応力の繰返しひずみに伴う変動 (FF 波、ひずみ範囲 0.01)

図 10 変形挙動の分離

に分けることができる。内部応力は抗応力と背応力から成る。

(3) 有効応力は非弾性ひずみ速度が $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ の範囲で非弾性ひずみ速度、ひずみ範囲に依存しない一定値をとる。

(4) 有効応力、抗応力はひずみ繰返し数に依存しない一定値をとるが、背応力は作用応力の軟化と同程度の軟化を示し、この材料のひずみ軟化挙動は背応力の軟化に支配されていると考えることができる。

(5) 抗応力は有効応力と同様、非弾性ひずみ速度依存性を示さないが、背応力は、最大応力と同程度の非弾性ひずみ速度依存性を示す。

(6) 以上の知見において、2 1/4 Cr-1 Mo 鋼では内部応力として背応力の他に抗応力が存在する点、有

効応力の値が非弾性ひずみ速度、ひずみ範囲に依存しない点は SUS 304 鋼と大きく異なる。

文 献

- (1) 森下・朝田・三橋, 機論, 51-462, A (昭 60), 307.
- (2) 森下・朝田・石川, 機論, 50-453, A (昭 59), 980.
- (3) Morishita, M., Taguchi, K., Asayama, T., Ishikawa, A. and Asada, Y., Application of the overstress concept for creep-fatigue evaluation of 304 steel in vacuum, *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 942, American Society of Testing Materials (to be published).
- (4) 浅山・程・橘・朝田, 信越地方新潟講演会, 論文 No. 87-0334 B.
- (5) Moreen, H. A., *Trans. ASME*, Ser. D, 92-1 (1970), 126.
- (6) 平・後藤・黒部・葛西, 材料, 21-221 (昭 47), 83.
- (7) 幡中・山田・広瀬, 機論, 45-398, A (昭 54), 1125.