粘塑性理論の高温非弾性解析への適用*
(温度変動下の変形挙動解析と寿命評価)岩崎 安宏^{*1}, 広江 哲幸^{*2}, 猪狩 敏秀^{*3}An Application of the Viscoplasticity Theory to the Inelastic
Analysis at Elevated Temperature
(On the Deformation and Lifetime Analysis
under Time-Varying Temperature)

Yasuhiro IWASAKI, Tetsuyuki HIROE, and Toshihide IGARI

A unified constitutive model and a continuous damage law are applied to analyze the deformation and life-time on $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel under time-varying temperature. The extended viscoplasticity model and the incremental life prediction law are employed and their material constants are determined at the temperature of 25°C to 600°C. Creep, tensile and cyclic loading tests are carried out under various temperature histories. The responses to sudden changes of temperature in the tensile tests are rather similar to those observed previously in the strain rate change tests. The viscoplasticity model is shown to reproduce the inelastic stress-strain behavior in the experiment, and its coupling with the damage model simulates the creep-fatigue damage accumulation of cyclic thermal fatigue tests.

Key Words: Plasticity, Creep, Fatigue, Unified Theory, Continuous Damage Law, Temperature Variation Effect

1. 緒 言

高温機器の強度評価の信頼性向上のためには高温クリープ域における応力・ひずみ挙動の解析技術の高精度化が不可欠であり、従来方法の改良とともに新しいタイプの統一形構成式モデルの調査・共同研究⁽¹⁾が進められている。また寿命評価方法についても、損傷を速度式で表現する連続損傷則モデルの適用⁽²⁾が試みられている。しかしこれらのモデルに対するこれまでの研究は、主として温度一定の下での挙動を対象にしているため、実際の高温機器の負荷条件である温度変動下の変形挙動・寿命評価への適用性については必ずしも十分な検討が行われていない。

著者らは既報⁽²⁾⁽³⁾で、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼(600°C)を対象に統一形構成式モデルである Krempl らによる粘塑性理論⁽⁴⁾を高温クリープ域に適用できるよう拡張し、

また連続損傷則モデルである増分形寿命推定法⁽⁵⁾と組合せたクリープ疲労寿命の解析例を示した。本研究では、提案した拡張モデルについて、クリープ効果の大きな 600°C からクリープ効果の少ない室温域までの $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼の材料関数・定数値の設定を試み、また温度変動条件下でのクリープ、引張り、疲労試験を実施し、モデルによる解析結果と実験結果の比較・検討を行った。さらに連続損傷則モデルと組合せることにより、熱サイクル疲労試験に対する寿命評価も試みた。以下、これらの概要について報告する。

2. 実験方法

材料は $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鋼板材 (SA 387 Gr. 22) NT 処理したものを使用した。詳細は文献(6)に示してある。表1に本研究で実施した温度変動効果試験(クリープ、引張り、繰返しひずみ)の条件を示している。ここで、ひずみは熱ひずみを除いた機械的ひずみである。クリープ試験は、室温でクリープ応力まで負荷した後、2種類の昇温速度($\dot{T}=0.1, 10^\circ\text{C/s}$)で 600°C まで昇温しながらクリープ変形を計測した。引張試験は2種類のひずみ速度で引張り、温度を 600°C と 500°C の間

* 昭和62年7月14日 東海支部三重地方講演会において講演、原稿受付 昭和62年1月20日。

^{*1} 正員、足利工業大学 (〒326 足利市大前町268-1)。

^{*2} 正員、三菱重工業(株)広島研究所 (〒733 広島市西区観音新町4-6-22)。

^{*3} 正員、三菱重工業(株)長崎研究所 (〒850-91 長崎市飽の浦町1-1)。

で変動させている。繰返しひずみ試験はひずみ(±1%)と温度(450°C±150°C)の対称三角波サイクルを周期150sでIn-phase, Out-of-phaseに組合せている。また各温度でのモデルの材料定数を設定するために基礎試験として表中に示すような室温から600°Cまでの定温度引張試験を実施した。そして参照データとして各温度におけるクリープ、リラクゼーション、疲労試験データ⁽⁶⁾⁽⁷⁾も用いた。

試験機・試験片は既報⁽²⁾と同様であり、加熱は高周波誘導加熱、冷却は圧縮空気ガス吐出し量で制御した。粘塑性モデルのひずみ速度効果は熱ひずみを除いた機械的ひずみに対するものであるから、試験は温度変動 ΔT に伴う熱ひずみ変動 $\alpha\Delta T$ (α :平均線膨脹率)を演算回路で打消したひずみについて制御または計測を行った。

3. 解析モデルとその適用方法

温度変動下における変形挙動を解析するに当たっては、通常の高温機器の強度解析で行われているように、構成式や損傷則の材料関数・定数値の温度による変動は変形と連成しないことを前提とした。したがって温度変動を考慮する場合の単軸の構成式は、既報⁽²⁾で提案した拡張粘塑性モデル式から次式で表される。

$$\dot{\epsilon}_M = \frac{\dot{\sigma}}{E[T]} + \frac{1}{E[T]} \cdot \frac{\sigma - g[\epsilon_M, T]}{k[\sigma - g, \epsilon_M, T]} \quad (1)$$

ここで

$$\epsilon_M = \epsilon - \alpha T \quad (2)$$

また

$$T = T[t] \quad (3)$$

[]内は関数の引数を示し、 σ, ϵ は工学的応力、ひず

みで、 T, t は温度、時間を、また $\dot{\cdot}$ は時間微分を示す。上式からヤング率 E 、平衡応力関数 g 、粘性関数 k の温度依存性を把握すれば、これらの式を数値積分することにより温度変動下の非弾性変形解析ができる。なお以下では機械的ひずみ ϵ_M を ϵ に置きかえて示す。また繰返し負荷の場合、本モデルでは g 関数と、 k 関数のひずみ依存を表す $\beta[\epsilon]$ 関数⁽²⁾が $\sigma=g$ となるごとにその点を基準点とし、Masing則を用いて更新されるが、温度変動によって基準点のひずみ座標は次の基準的に移動するまで保持されたとした。これは g, β が定ひずみ速度の引張曲線に関し応力方向にほぼ比例的であることに基づいており、 g と β とは負荷反転も含め同等に取り扱える。

次に既報⁽³⁾で $2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo}$ 鋼、600°Cのクリープ疲労寿命解析に用いた連続損傷則は、温度変動下における寿命評価に適用するためには次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{D}_f &= F \cdot |\dot{\epsilon}_{in}|^{n_f(T)} \left| \frac{\sigma}{\sigma_f(T)} \right|^{m_f(T)} \\ \dot{D}_c &= C \cdot |\dot{\epsilon}_{in}|^{n_c(T)} \left| \frac{\sigma}{\sigma_c(T)} \right|^{m_c(T)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで D_f, D_c は各々、疲労試験、クリープ試験において支配的な損傷を表し、 $D_f + D_c = 1$ のとき巨視的き裂が発生するとしている。 ϵ_{in} は非弾性ひずみを示す。係数 F, C は負荷波形($\sigma, \dot{\epsilon}_{in}$ の正負)によって±1または零に設定するが、この特性は温度によって変化しないとした。以上から式(4)の6個の定数の温度依存性が把握できれば式(1)と組合せて時々刻々の損傷の累積が解析できることがわかる。なお実際の数値解析では材料定数値や基準点の変化は数値積分の各時間ステ

表 1 温度変動効果試験および基礎試験条件

Deformation tests under temperature change condition			Tensile tests at constant temp.		Other reference data																																																		
Creep	Tensile	Cyclic strain	Case	T (°C)
<p>T, σ 600°C 25°C $\sigma_0 = 294 \text{ MPa}$ $\sigma = 150 \text{ MPa/s}$</p> <p>$\dot{T} = 0.1^\circ\text{C/s}$: Case 1a $= 10^\circ\text{C/s}$: Case 1b</p>	<p>T, ϵ 600°C 25°C 15% 0 t_1, t_2, t_3, t_4, t_5</p> <table><tr><th>Case</th><th>2a</th><th>2b</th></tr><tr><td>$\dot{\epsilon} (\%/s)$</td><td>0.03</td><td>0.001</td></tr><tr><td>$t_1 \text{ (s)}$</td><td>10</td><td>300</td></tr><tr><td>t_2</td><td>17</td><td>500</td></tr><tr><td>t_3</td><td>27</td><td>800</td></tr><tr><td>t_4</td><td>33</td><td>1000</td></tr><tr><td>t_5</td><td>50</td><td>1500</td></tr></table>	Case	2a	2b	$\dot{\epsilon} (\%/s)$	0.03	0.001	$t_1 \text{ (s)}$	10	300	t_2	17	500	t_3	27	800	t_4	33	1000	t_5	50	1500	<p>$\dot{\epsilon} = \pm 0.02667 \%/s, \dot{T} = \pm 5^\circ\text{C/s}$</p> <p>Case 3a (In-phase)</p> <p>Case 3b (Out-of-phase)</p>	<table><tr><td>4-1</td><td>25</td><td>0.2</td></tr><tr><td>2</td><td>300</td><td>0.2</td></tr><tr><td>3</td><td>500</td><td>0.1</td></tr><tr><td>4</td><td>500</td><td>0.03</td></tr><tr><td>5</td><td>500</td><td>0.001</td></tr><tr><td>6</td><td>550</td><td>0.1</td></tr><tr><td>7</td><td>550</td><td>0.001</td></tr><tr><td>8</td><td>600</td><td>0.1</td></tr><tr><td>9</td><td>600</td><td>0.03</td></tr><tr><td>10</td><td>600</td><td>0.001</td></tr></table>	4-1	25	0.2	2	300	0.2	3	500	0.1	4	500	0.03	5	500	0.001	6	550	0.1	7	550	0.001	8	600	0.1	9	600	0.03	10	600	0.001	<p>$T = 300^\circ\text{C}$ 500°C 550°C 600°C</p> <p>Tests: tensile creep relaxation fatigue (PP, CP, PC, CC)</p>
Case	2a	2b																																																					
$\dot{\epsilon} (\%/s)$	0.03	0.001																																																					
$t_1 \text{ (s)}$	10	300																																																					
t_2	17	500																																																					
t_3	27	800																																																					
t_4	33	1000																																																					
t_5	50	1500																																																					
4-1	25	0.2																																																					
2	300	0.2																																																					
3	500	0.1																																																					
4	500	0.03																																																					
5	500	0.001																																																					
6	550	0.1																																																					
7	550	0.001																																																					
8	600	0.1																																																					
9	600	0.03																																																					
10	600	0.001

図 1 各温度での応力とひずみ速度の関係 ($\epsilon=1\%$) 図 2 温度と g 値, σ_{flow} の関係 ($\epsilon=1\%$)

図 4 損傷則の定数設定のための基礎データ

図 3 各温度での粘性関数 k

表 2 各温度における粘塑性モデルの定数値

 $(2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo 鋼})$

T		600°C	550°C	500°C	300°C	25°C (R.T.)
g	$\bar{E}$ MPa	6725	28703	51295	127027	194219
	$\bar{E}_t$ MPa	67	529	1146	2656	3709
	$\bar{g}_s$ MPa	14.7	59.8	109	266	393
	ξ	4.0	4.5	4.95	5.0	5.0
	$R_1 = 0.7 \text{ (Const.)}$					
k	$r (=g/\bar{\sigma}_f \beta)$	0.0442	0.170	0.295	0.678	0.946
	B_1	5.54	6.04	6.52	6.74	7.02
	B_2 MPa ²	447	4467	43539	24212	10765
	X_{21} MPa	404	485	1215	1498	1866
	X_{11} MPa	336	342	346	146	26
	X_{20} MPa	45.9	176	528	990	1595
	X_{10} MPa	= 24.5 (const)				
$E = \bar{E} / r$						

表 3 各温度における損傷則の定数値 ($2\frac{1}{4}\text{Cr-1Mo 鋼}$)

T (°C)	n_f	n_c	m_f	m_c	σ_f (MPa)	σ_c (MPa)
300	1.53	0.0	3.10	15.2	364	4260
500	0.68	-0.10	2.73	11.4	2013	1084
550	0.79	-0.15	1.94	10.5	2007	862
600	0.74	-0.78	2.86	13.9	980	845

$$F = 1, C = \begin{cases} 1, \sigma \geq 0 \\ -1, \sigma < 0, D_c > 0 \\ 0, \sigma < 0, D_c = 0 \end{cases}$$

ップごとにその温度での値に設定し直しながら実施し、時間ステップの分割は1ステップで0.5°C以下の温度変化になる程度に設定した。

4. 定数設定

4.1 構成式 各温度での材料関数・定数の設定は600°Cを対象とした既報⁽²⁾と同様である。図1は1%ひずみにおける各温度でのクリープ発生限界応力 g 値の推定($\dot{\epsilon}=10^{-10}\%/s$ の応力値)を示している。温度25°C, 300°Cの値は仮定値である。 g 関数曲線の形は高

速引張曲線と応力方向に比例的であると仮定し、既報と同様、 $\bar{E}$, $\bar{E}_t$, $\bar{g}_s$, ξ , R を用いた ϵ の奇関数式として表した。図2は温度と g 関数値、流れ応力 σ_{flow} の関係($\epsilon=1\%$)を示す。この曲線間がひずみ速度効果域を表している。過大応力 $X=\sigma-g$ とひずみの正関数である粘性関数 $k[X, \epsilon]$ または $k[X, \beta[\epsilon]]$ は各温度での引張曲線、クリープ変形データを用いて図3のように表された。これからひずみ依存性は高温域以外では少ないことがわかる。(図3中斜線をつけ変化の範囲を示している。)これらの曲線は既報と同様に定数 B_1 , B_2 , X_{21} , X_{11} , X_{20} , X_{10} を用いた双曲線として定式化した。ひずみ依存性を示す β 関数は g と応力方向に比例的であるとし、 $\gamma=g/\sigma_0\beta$ を設定した。($\sigma_0\beta$ が高速引張曲線と一致するようにした。)得られた各温度での材料関数の定数値を表2に示す。これらの温度依存性は直線

図5 各温度での引張変形

(a) クリープ変形-Case 1a, 1b

(b) 引張変形-Case 2a

(c) 引張変形-Case 2b

図6 温度変動下での単調負荷に対する応答

または双曲線で近似した。また繰返しひずみ軟化は k に乗ずる係数 $\Delta\lambda$ で表現するが定常ヒステリシスの解析では得られている 600°C での値 (引張り: 0.74, 圧縮: 0.775) をそのまま用いた。

4.2 損傷則 式(4)の定数を各温度について設定するには既報⁽³⁾で述べたようにクリープラプチャ時間 tr と最小クリープレート $\dot{\epsilon}_c$ の特性式 [$tr=(\sigma_R/\sigma)^\nu$, $\dot{\epsilon}_c=(\sigma/\sigma_0)^{\beta_0}$] の定数値 σ_R , ν , σ_0 , β_0 と定常ヒステリシスループ形状 [$e_{in}=(2s-1)^a$, $e_{in}=(\epsilon_{in}-\epsilon_{in,min})/$

$\Delta\epsilon$, $s=(\sigma-\sigma_{min})/\Delta\sigma$] を表す指数 a および 4 個のクリープ疲労寿命データ⁽⁷⁾が必要である。図4にこれらの基礎データの一部を示す。 a は高温域でひずみ速度の関数となる。表3に設定された定数値を示す。

5. 試験結果と解析結果の比較

図5は基本となる各温度の引張変形の解析を行い、実験結果と比較して定数値が妥当に設定されていることを確認している。図6の(a)~(c)は温度変動下の

図7 温度変動下の繰返し負荷に対する応答 (第1サイクル)

図8 定常サイクル中の変形挙動と損傷累積の解析結果

図9 熱サイクル疲労寿命推定結果と高温疲労試験結果との関係

クリープと引張変形について解析結果と実験結果を比較している。クリープ変形は解析結果のほうがやや大きい。500～600°Cでの急速な変形増加はよく再現されている。台形波温度変動下の引張変形では500°Cと600°Cの定温度引張曲線も併記している。解析、実験とも両曲線間を移動する挙動を示し、両者はほぼ合致している。図7は温度サイクルとひずみサイクルの組合せ(In-phase, Out-of-phase)の最初のサイクル中の変形応答を示している。図7中には変動する g 関数も併記した。Case 3 a, 3 bの応力・ひずみ曲線は互いに点対称に近い関係にあり、解析結果と実験結果はほぼ対応している。図8は図7で第1サイクルを示した熱サイクル疲労試験の定常サイクルでの応力・ひずみ挙動と損傷挙動を示している。疲労損傷 D_f はサイクル中の全域で蓄積されるがクリープ損傷 D_c は高温域で引張応力側の限られた期間に蓄積されるのがわかる。この損傷に基づく寿命はIn-phase(343サイクル)のほうがOut-of-phase(610サイクル)より低寿命であり、通常予想される結果を示した。実験結果は各々405, 295サイクルでほぼ同等の寿命だが大小関係は逆であった。

6. 考 察

本研究で室温から600°Cまでの材料関数が設定でき、拡張粘塑性モデルは広範囲温度域で一般性があると考えられる。図6(b), (c)で示した温度変動効果は既報⁽²⁾のひずみ速度変動効果と類似しており、両効果の対応性は興味深い。また定温度曲線間を移行する変形挙動または温度履歴効果の不在は全ひずみに基づく本モデルに適合する挙動⁽⁴⁾である。そしてこれらの挙動はまた塑性ひずみとクリープひずみを等価として

統一化したことを支持している。ただし、この等価性は本研究がクリープ期間の熱回復や時効の効果を含まない範囲の試験であったからとも考えられ、非等価性⁽⁸⁾の導入は今後の課題である。また温度変動時の解析変形に若干のふらつきが見られるがこれは各温度において設定された粘性関数の間にやや不連続性があることによっていると考えている。

増分形寿命推定法についても広範囲温度域と熱サイクル疲労への適用性が確認された。さらに連続損傷則としての特徴を進展させれば、応力・ひずみ解析と組合せて高温機器の損傷解析システムとして開発を図ることができる。また本解析では実験結果との対応は十分ではなかったが、図9に示すように他の高温疲労試験結果⁽⁷⁾と比較するとほぼ妥当な寿命推定と考えられ、今後更に検討を進めたい。

7. 結 論

統一形構成式モデルと連続損傷則モデルを用いて温度変動下の変形挙動と寿命評価の適用性について検討し次の結果を得た。

- (1) 拡張粘塑性モデルについて室温から600°Cまでの2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の材料関数が温度の関数として設定できた。温度変動下の変形挙動(クリープ、引張り、繰返しひずみ)解析結果は実験結果と良好な一致を示し、本モデルの有効性が確認された。
- (2) 本研究により、広範囲温度域で非弾性ひずみを統一的に取扱うことの妥当性が検証できた。また温度変動効果にひずみ速度変動効果との類似性が認められた。

- (3) 増分形寿命推定法についても同様の定数設定ができ、粘塑性モデルと組合せて熱サイクル疲労寿命の推定ができることがわかった。

今後は多軸応力場への適用についてモデルの発展を図ってゆきたい。最後に、ご指導をいただいた東京大学 朝田教授に感謝致します。

文 献

- (1) 材料学会, 高温強度部門委員会, 非弾性解析法調査作業グループ報告(第I, II報), (昭61).
- (2) 広江・猪狩, 機論, 51-461, A (昭60), 248.
- (3) 広江, 機論, 52-474, A (昭61), 430.
- (4) Krempl, E., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 765 (1982), 5.
- (5) Satoh, M. and Krempl, E., *ASME PVP*, 60 (1982), 71.
- (6) 山内・ほか2名, 三菱重工技報, 20-5 (昭58), 1.
- (7) Yamauchi, M., ほか2名, *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 942 (1987) 予定.
- (8) 大橋・ほか2名, 機論, 50-450, A (昭59), 216.